



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid  
Tel.: 91 336 3060  
info.industriales@upm.es

[www.industriales.upm.es](http://www.industriales.upm.es)



Juan Ángel Sánchez Gómez

05 TRABAJO FIN DE MASTER

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MASTER

# LOCALIZACION DE FALTAS EN LÍNEAS DE TRES TERMINALES A PARTIR DE LAS MEDIDAS DE LOS RELES DE UNA PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE LÍNEA

SEPTIEMBRE 2016

**Juan Ángel Sánchez Gómez**

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE MASTER:  
**Antonio Pastor Gutiérrez**

TRABAJO FIN DE MASTER  
PARA LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE MASTER EN  
INGENIERÍA INDUSTRIAL



POLITÉCNICA

## DEDICATORIA Y CITA CIENTÍFICA

Este modesto trabajo está dedicado a todos los profesionales y académicos del ámbito de la Ingeniería Eléctrica, por alumbrar a la Humanidad y contribuir con su trabajo a construir una sociedad más justa y avanzada.

*“Invention is the most important product of man's creative brain. The ultimate purpose is the complete mastery of mind over the material world, the harnessing of human nature to human needs”*

*Nikola Tesla, My inventions*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecerle a mi familia el apoyo que siempre me ha brindado, tanto durante la realización de este trabajo como durante los años que he pasado como estudiante. Los logros y avances que he conseguido hasta la fecha los debo en gran medida a su apoyo.

A Irene, por haber estado conmigo en los buenos momentos y en los no tan buenos en los últimos años de carrera.

Al tutor de este trabajo, el profesor D. Antonio Pastor, por haberme guiado para poder desarrollarlo con éxito, y a D. Pedro Aguilera, por ponerme en contacto con él y por los útiles consejos que me dio.

A mis compañeros de trabajo de Sacyr Industrial por la preocupación que han mostrado por mí en estos últimos meses y por sus recomendaciones y enseñanzas.

A todos mis amigos, especialmente a aquellos que me han acompañado en los últimos años y con los que tan buenos momentos he pasado.

J. A. Sánchez Gómez

## RESUMEN

El presente trabajo se enmarca dentro de un área de gran importancia dentro de la Ingeniería Eléctrica como es el de los sistemas de protecciones eléctricas. Los sistemas de protección eléctricos protegen los elementos que forman parte de los sistemas de energía eléctrica, como las líneas de transmisión de electricidad o las subestaciones, frente a perturbaciones, tanto internas como externas, que pueden producirse en dichos sistemas.

Entre las perturbaciones que pueden producirse en un sistema eléctrico destacan los cortocircuitos o faltas debido a su frecuencia de ocurrencia relativamente elevada y a los graves efectos que pueden producir en la seguridad y estabilidad de operación del sistema eléctrico.

Entre los efectos adversos que puede provocar un cortocircuito en un sistema eléctrico se encuentran: los daños provocados a materiales y equipos que forman parte de la infraestructura eléctrica, los cortes en el suministro a los consumidores finales de electricidad y las pérdidas económicas asociadas para las compañías eléctricas, o la afectación a la estabilidad del sistema eléctrico.

Dentro de los sistemas de protección utilizados para proteger las líneas de transmisión de energía eléctrica, se puede establecer una división entre los dispositivos encargados de la detección de cortocircuitos y los dispositivos que determinan la localización del lugar en el que ocurre la falta.

Los primeros, entre los que se encuentran los relés de protección de distancia y los relés de sobreintensidad, reciben las señales provenientes de los equipos de medida: transformadores de corriente y transformadores de tensión. En función de los valores de estas señales de tensión e intensidad y de la lógica seguida por los algoritmos implementados en los propios relés, éstos actuarán enviando señales que provoquen la operación de equipos de maniobra, como los interruptores, que aislarán el defecto y evitarán su propagación a otros elementos del sistema.

Los relés de protección deben de detectar la ocurrencia de un cortocircuito en el menor tiempo posible (en un orden de ms) para proteger la zona afectada de forma inmediata y evitar la afectación de otras zonas. La coordinación entre los relés de protección es de vital importancia para asegurar la fiabilidad, la selectividad y la seguridad en la operación de las protecciones.

Por otra parte, los dispositivos encargados de localizar el lugar en el que ocurre la falta, también llamados localizadores de faltas, reciben, al igual que los relés de protección, las señales de tensiones e intensidades procedentes de los transformadores de medida. Mediante métodos de cálculo desarrollados en los algoritmos implementados en ellos, se evalúa la localización de la falta a partir de las señales de entrada.

La precisión en la localización del lugar en el que ocurre el cortocircuito debe ser muy elevada para poder solucionar el defecto ocurrido en la línea en el menor tiempo posible. Cuanto mayor sea esta precisión, más rápidamente detectarán los equipos de personal de reparación de las compañías eléctricas el lugar en el que ha ocurrido el defecto y devolverán antes a la línea a sus condiciones normales de operación.

Sin embargo, la velocidad para determinar la localización del lugar en falta por parte del dispositivo localizador de faltas no es tan crítica y se encuentra en el orden de segundos e incluso minutos. Por esta razón, los dispositivos localizadores de faltas situados en los distintos extremos de una línea de varios terminales pueden intercambiar un gran volumen de datos a través de diversos canales de comunicación y, además, los retardos

introducidos por la filtración de las señales y por la sincronización de los datos provenientes de varias fuentes no suponen un problema.

Para la localización de faltas, existen técnicas basadas en la obtención de datos recogidos en un único terminal de la línea. Otras técnicas, de mayor precisión, requieren considerar datos provenientes de dos o más terminales de una línea de transmisión. Esto conlleva también unas mayores exigencias en cuanto a la coordinación de los dispositivos situados en diferentes extremos de la línea.

En el primer capítulo de este trabajo, se introducen las técnicas de localización de faltas mencionadas. También se incluye en esta introducción algunas consideraciones básicas sobre cortocircuitos, como su tipología y las causas y consecuencias que puede tener su ocurrencia sobre un sistema eléctrico. Además, se mencionan los principales tipos de protecciones que suele haber en las líneas de transporte de electricidad. Dentro de estos tipos de protecciones se hace especial hincapié en los relés de protección diferencial, que son los dispositivos en los que se implementaría el algoritmo desarrollado en este trabajo y que constituye el principal objetivo del mismo.

El algoritmo localizador de faltas desarrollado determina el lugar en el que ocurre un cortocircuito en una línea de tres terminales. Las líneas con varios terminales constituyen casos especiales dentro de la protección de las líneas de transmisión de electricidad y las técnicas de localización de faltas en este tipo de líneas requieren de métodos de cálculo específicos y requerimientos especiales para los dispositivos localizadores de faltas.

El algoritmo se ha desarrollado partiendo de un modelo de línea de tres terminales, presentado de forma esquemática en el Capítulo 3. En este mismo capítulo también se presenta el Teorema de Fortescue, uno de los más importantes de la Ingeniería Eléctrica, el cual se utiliza en todos los desarrollos de ecuaciones a lo largo del trabajo. Por último, en el Capítulo 3 se explica el método de cálculo empleado para simular situaciones de cortocircuito, particularizado para diferentes tipos de falta. Mediante estas simulaciones se obtendrán las tensiones e intensidades de entrada del algoritmo que servirán para evaluar su funcionamiento.

En el Capítulo 4 se desarrolla la técnica de localización de faltas a partir de magnitudes de lazo de falta, que constituye el fundamento de los métodos basados en la utilización de datos que proceden de un único terminal de línea. El desarrollo teórico de esta técnica y su aplicación a casos particulares de falta es importante para conocer el origen de las expresiones matemáticas utilizadas en el algoritmo desarrollado.

El Capítulo 5 desarrolla una explicación del método de los relés diferenciales aplicado a casos de cortocircuito particulares en una línea de dos terminales. A partir de esta técnica de localización de faltas se obtiene la ecuación básica de lazo de falta, que será la expresión a partir de la cual el algoritmo determina la localización del lugar en el que ocurre un cortocircuito. También se obtienen mediante esta técnica los diferentes valores de los coeficientes de ponderación que permiten particularizar para diferentes tipos de cortocircuito la ecuación básica de lazo de falta.

La explicación e implementación del algoritmo localizador de faltas para una línea de tres terminales se efectúan en el Capítulo 6. Las expresiones matemáticas empleadas en el algoritmo se fundamentan en los resultados obtenidos en los capítulos anteriores. En cuanto a la estructura del algoritmo, está formada por tres subrutinas. Cada una de las subrutinas evalúa la localización de la falta en cada uno de los tres tramos de la línea. Una vez ejecutadas las tres subrutinas, actúa un procedimiento de selección que debe seleccionar la subrutina válida y el tramo de línea en el que realmente ocurre el

cortocircuito. La explicación de este procedimiento de selección también está contenida en el Capítulo 6.

La evaluación del funcionamiento del algoritmo, es decir, su capacidad para calcular con precisión el lugar en el que ocurre un cortocircuito en una línea de tres terminales, se realiza en el Capítulo 7. Para poder evaluar su funcionamiento, se utilizan como entradas del algoritmo las magnitudes de fase de las tensiones e intensidades obtenidas a partir de la simulación de diferentes situaciones de falta aplicadas en la línea modelo del Capítulo 3. Los resultados de las simulaciones de cortocircuitos se obtienen siguiendo el método de cálculo presentado en el Capítulo 3.

En el Capítulo 8, como sugerencias para trabajos futuros, se proponen una serie de mejoras que podrían aplicarse al algoritmo desarrollado en este trabajo, las cuales aumentarían la precisión en la localización de la falta.

En los últimos capítulos se recogen las conclusiones sobre el trabajo desarrollado, y se recopilan las referencias que se han seguido durante su desarrollo. También se incluye un capítulo donde se expone la planificación que se ha seguido durante el desarrollo del trabajo y el presupuesto asociado a su ejecución.

Por último, se incluyen tres anexos que constituyen las últimas páginas que forman parte de este trabajo. El primero recoge un breve desarrollo del modelo de línea de parámetros distribuidos para líneas de transmisión de grandes longitudes, que se utiliza en las ecuaciones que forman parte del algoritmo desarrollado. El segundo anexo es una versión del código del algoritmo localizador de faltas, el cual ha sido programado con Matlab. El último anexo corresponde al código de Matlab utilizado para simular una de las situaciones de falta (falta *b-c-g* en tramo de línea *B-T*) que se han programado para evaluar el funcionamiento del código del localizador de faltas.

**Palabras clave:**

*Cortocircuito o falta, líneas de transmisión de electricidad multiterminales, tensión e intensidad de cortocircuito, impedancia de falta, magnitudes de fase o fasores, redes de secuencia simétricas, localizador de faltas, relé de protección de distancia, relé de corriente diferencial, magnitudes de lazo de falta.*

## ÍNDICE

<b>DEDICATORIA Y CITA CIENTÍFICA .....</b>	<b>1</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>2</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>3</b>
<i>Palabras clave:.....</i>	<i>5</i>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>6</b>
<b>1.-INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
<b>1.1.-Tipos de cortocircuitos. Generalidades .....</b>	<b>8</b>
<b>1.2.-Tipos de protecciones empleadas en líneas de transmisión .....</b>	<b>9</b>
<b>1.3.-Relés de corriente diferencial para protección de líneas aéreas .....</b>	<b>10</b>
<b>1.4.-Métodos de localización de faltas.....</b>	<b>11</b>
<i>1.4.1.-Requerimientos que debe presentar un localizador de faltas .....</i>	<i>11</i>
<i>1.4.2.-Obtención de los parámetros de la línea.....</i>	<i>11</i>
<i>1.4.3.-Técnicas de localización de faltas basadas en la impedancia vista desde en un único terminal. Uso de magnitudes de lazo.....</i>	<i>12</i>
<i>1.4.4.-Técnicas de localización de faltas basadas en la utilización de datos procedentes de dos terminales .....</i>	<i>12</i>
<b>2.- OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
<b>3.- CÁLCULO DE TENSIONES E INTENSIDADES DE CORTOCIRCUITO. RED MODELO. ....</b>	<b>15</b>
<b>3.1.-Teorema de Fortescue .....</b>	<b>15</b>
<i>3.1.1.-Relación entre magnitudes simétricas y de fase.....</i>	<i>16</i>
<b>3.2.-Esquema de la red utilizada como modelo .....</b>	<b>17</b>
<b>3.3.-Cálculo de cortocircuitos usando <math>Z_{\text{barra}}</math>.....</b>	<b>19</b>
<b>3.4.-Particularización del cálculo de tensiones e intensidades de cortocircuito para los diferentes tipos de falta.....</b>	<b>23</b>
<b>4.-DESCRIPCIÓN DEL CÁLCULO DE DISTANCIA DE FALTA A TRAVÉS DE MAGNITUDES DE LAZO .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1.- Magnitudes de lazo. Falta bifásica .....</b>	<b>25</b>
<b>4.2.- Magnitudes de lazo. Falta monofásica .....</b>	<b>27</b>
<b>4.3.-Magnitudes de lazo. Resumen de situaciones particulares de falta .....</b>	<b>28</b>
<b>4.4.- Comprobación del error introducido al considerar resistencias de falta en el cálculo de las distancias de falta a partir de las magnitudes de lazo .....</b>	<b>28</b>
<b>5.- MÉTODO DE LOS RELÉS DIFERENCIALES EN LÍNEA DE 2 TERMINALES .....</b>	<b>30</b>

<b>5.1.- Descripción de la ecuación básica de lazo de falta a partir de casos particulares .....</b>	<b>30</b>
5.1.1.- <i>Falta monofásica c-g</i> .....	31
5.1.2.- <i>Falta bifásica b-c</i> .....	33
<b>5.2.- Resumen de valores de los coeficientes de ponderación de la ecuación básica de lazo de falta.....</b>	<b>35</b>
<b>5.3.- Aplicación al caso de una línea de dos terminales para diferentes casos de cortocircuito con <math>R_F</math>.....</b>	<b>36</b>
<b>6.- MÉTODO DE LOS RELÉS DIFERENCIALES PARA UNA LÍNEA DE 3 TERMINALES. ALGORITMO LOCALIZADOR DE FALTAS.....</b>	<b>38</b>
6.1.- Algoritmo de localización de falta. Subrutina <i>SUB_A</i> .....	39
6.2.- Algoritmo de localización de faltas. Subrutinas <i>SUB_B</i> y <i>SUB_C</i> .....	41
6.2.1.- <i>Modelo de línea de parámetros distribuidos</i> .....	41
6.2.2.- <i>Subrutina SUB_B</i> .....	42
6.2.3.- <i>Subrutina SUB_C</i> .....	44
6.3.- Selección de la subrutina válida .....	44
<b>7.- EVALUACIÓN DEL ALGORITMO DE LOCALIZACIÓN DE FALTAS.....</b>	<b>46</b>
7.1.- Consideraciones previas .....	46
7.2.- Resultados .....	46
<b>8.- SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>52</b>
8.1.- Obtención de magnitudes cortocircuito más reales.....	52
8.2.- Cálculo preciso de corriente de falta usando las corrientes de secuencia directa superpuesta .....	52
8.3.- Compensación del efecto de la capacidad y extensión de la utilización del modelo de línea larga .....	52
<b>9.- CONCLUSIONES .....</b>	<b>54</b>
<b>10.- BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>56</b>
<b>11.- PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO .....</b>	<b>57</b>
<b>ANEXO I. MODELO DE LÍNEA DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS .....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO II. CÓDIGO DEL ALGORITMO LOCALIZADOR DE FALTAS.....</b>	<b>64</b>
<b>ANEXO III. CÓDIGO UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN DE SITUACIÓN DE FALTA TIPO <i>b-c-g</i> (EN TRAMO <i>B-T</i>).....</b>	<b>70</b>



## 1.-INTRODUCCIÓN

### 1.1.-Tipos de cortocircuitos. Generalidades

De forma general, se denomina falta o cortocircuito, a la conexión accidental a través de una impedancia relativamente baja, de dos o más puntos del sistema que en una situación normal tienen tensiones diferentes.

En general, las faltas eléctricas se producen al fallar el aislamiento por diversas causas: pérdida de las propiedades aislantes del medio (envejecimiento, contaminación, etc.), sobretensiones (tanto de origen externo como interno) o efectos mecánicos diversos (roturas, deformaciones, desplazamientos, etc.).

Otras causas que pueden provocar la ocurrencia de cortocircuitos pueden ser la acción de los agentes atmosféricos y fenómenos como errores humanos o impacto de animales u objetos sobre la línea.

Las faltas pueden ser de los siguientes tipos:

-*Monofásicas* si la falta se produce entre una fase y tierra. Faltas *a-g, b-g, c-g*, en función de la fase en la que se producen.

-*Bifásicas* si la falta se produce entre dos fases. Faltas *a-b, b-c, c-a*.

-*Bifásicas a tierra* si la falta es entre dos fases y tierra. Faltas *a-b-g, b-c-g, c-a-g*.

-*Trifásicas* si la falta afecta a las tres fases. Faltas *abc* y *abcg*.

Las faltas trifásicas se denominan también faltas simétricas, ya que al estar involucradas las tres fases, el sistema de tensiones e intensidades sigue siendo equilibrado tras la falta. Por el contrario, las faltas monofásicas y bifásicas con o sin contacto a tierra, afectan de distinta manera a las diferentes fases, por lo que dan lugar a sistemas de tensiones e intensidades desequilibrados, denominándose por este motivo faltas asimétricas.

Además, los cortocircuitos producen un aumento sustancial en las corrientes hacia el punto de la falta, tal que su magnitud puede suponer varias veces el valor de la corriente normal de carga. Por lo tanto, los componentes del sistema eléctrico pueden ser sometidos a grandes esfuerzos, no solamente desde el punto de vista térmico sino también desde el mecánico.

Los efectos perjudiciales que las faltas provocan son numerosos y están asociados, fundamentalmente, a las elevadas corrientes que se establecen en el sistema como consecuencia de una situación de falta, aunque en ocasiones también pueden provocar fenómenos de sobretensiones. Los principales efectos pueden resumirse en los siguientes:

-Calentamiento de conductores por efecto Joule, lo que en función del valor y la duración de la corriente de cortocircuito puede provocar deterioros irreversibles.

-Esfuerzos electrodinámicos, con la posibilidad de roturas y desplazamientos bruscos que pueden dar lugar a nuevas faltas.

-Variaciones de tensión, con caídas en las fases involucradas en el cortocircuito y eventuales elevaciones en las otras fases.

La ocurrencia de cortocircuitos en la etapa de transporte de energía eléctrica, además de afectar a la seguridad y a la estabilidad del sistema eléctrico interconectado, hace que las empresas eléctricas cuenten anualmente con unas enormes pérdidas económicas.

Estas pérdidas económicas se derivan de la interrupción del suministro a los consumidores finales de energía eléctrica durante el tiempo de reparación y restauración de servicio tras la ocurrencia de una falta y los costos asociados a estas operaciones.

La correcta selección de los equipos de protección y una predicción y organización correcta del mantenimiento de la línea son claves para predecir y mitigar los efectos perjudiciales que puede provocar la ocurrencia de perturbaciones en el sistema.

Desde el punto de vista de la operación segura de la línea, cobra una gran importancia la rápida detección de un incidente y su localización precisa para solucionarlo en el menor tiempo posible de manera que la afectación a la seguridad y estabilidad del sistema sea mínima.

## **1.2.-Tipos de protecciones empleadas en líneas de transmisión**

Entre los principales equipos de protección de una línea de transporte de electricidad en alta tensión, se encuentran los relés de distancia. La protección mediante relés de distancia deberá tomarse en consideración cuando la protección mediante relés de sobreintensidad es demasiado lenta, o bien no es selectiva.

Los relés de distancia se emplean, generalmente, para la protección principal y de apoyo contra faltas entre fases de líneas de subtransporte y de las líneas de transporte donde es necesario el reenganche automático de alta velocidad para mantener la estabilidad y donde puede tolerarse un breve retraso para faltas en los extremos de las zonas.

Los relés de sobreintensidad se han utilizado, generalmente, para protección principal y de apoyo de faltas a tierra, pero actualmente se sustituyen este tipo de relés por relés de distancia para faltas a tierra.

El principio de funcionamiento de un relé de distancia se basa en considerar la impedancia de una línea proporcional a la longitud de la misma, lo que es suficiente para medir esta impedancia. Las impedancias de línea que evalúa el relé de distancia se obtienen partiendo de las corrientes e intensidades de fase.

La ventaja principal de los relés de distancia es que su operación por diseño, no depende de las condiciones de generación del sistema (lo que sí ocurre con relés de sobreintensidad), ni de la configuración del mismo.

Sin embargo, el uso de relés de distancia para proteger una línea de tres terminales puede presentar los siguientes inconvenientes:

- Efectos de "infeed" debidos a la conexión de tres tramos. Esto da lugar a que las impedancias aparentes vistas por el relé se modifiquen.
- Variación de la impedancia vista por el relé debido a las corrientes de prefalta.
- Efecto de sobrealcance para faltas externas, de nuevo debido a la aportación intermedia.
- Operación incorrecta ante faltas externas debido a la aportación del terminal más cercano.

En estos casos se suelen aplicar protecciones de distancia con comunicación, o protecciones unitarias más complejas (protección diferencial, de comparación direccional o de comparación de fase).

### 1.3.-Relés de corriente diferencial para protección de líneas aéreas

El principio de funcionamiento de la protección diferencial, cuya zona de actuación está limitada por la localización de los transformadores de corriente, es considerado superior en lo que se refiere a la selectividad, sensibilidad y rapidez de operación si se compara con el de otros esquemas de protecciones, como el de comparación direccional, comparación de fase o esquemas de protección de distancia.



*Figura 1: Relé de corriente diferencial modelo MiCOM P54X de la marca Schneider Electric. Fuente: <http://www.schneider-electric.co.in/en/product-range/>*

La función diferencial responde a la suma de todas las corrientes de su zona de protección que, idealmente, debería ser igual a cero. Sin embargo, en la práctica, los errores de medida y las capacidades de la línea presentes dentro de la zona de protección podrían dar lugar a una falsa señal diferencial. Esto requiere el uso de contramedidas, que pueden ir desde añadir retrasos de tiempo intencionados en la actuación de las protecciones, restricciones porcentuales y restricciones de armónicos y bloqueos, hasta algoritmos sofisticados de detección de faltas externas y técnicas adaptativas de contención de disparo de las protecciones.

Cuando se aplican en protección de líneas, las protecciones diferenciales se enfrentan a las limitaciones impuestas por la longitud de las mismas.

Actualmente se encuentran ampliamente implementados en el campo de la protección de líneas los esquemas con relés de corriente diferencial basados en microprocesadores utilizando canales de comunicación digitales.

La implantación generalizada de canales de comunicación a larga distancia, como las conexiones digitales a través de microondas y fibra óptica directa, o los sistemas de red óptica síncrona y jerarquía digital síncrona (cuyas siglas en inglés son *SONET* y *SDH*, respectivamente), permite la expansión de las aplicaciones de esquemas de protección de líneas con relés de corriente diferencial.

Entre los beneficios clave de las protecciones diferenciales cuando se aplican a la protección de líneas de transporte de electricidad se encuentran los siguientes:

- Presentan un buen funcionamiento en líneas de varios terminales, líneas con compensación en serie y líneas de cualquier longitud cuando se comparan con esquemas de protección de distancia o de comparación direccional.

-Presentan una inmunidad considerable frente a variaciones en las condiciones del sistema, la evolución del mismo, o fuentes de corriente de cortocircuito poco habituales como generadores eólicos, generadores fotovoltaicos, y fuentes basadas en electrónica de potencia en general.

-Tienen una alta sensibilidad.

-Su aplicación es simple, al menos desde el punto de vista de la protección.

Las necesidades a las que actualmente se enfrentan los relés de corriente diferencial para protección de líneas incluyen, entre otras, la compensación de la corriente de carga de la línea, las aplicaciones en líneas multiterminales, la redefinición de las funciones de respaldo, o la acomodación de los transformadores dentro de la línea.

Desde el punto de vista del diseño del relé, éste debe de presentar altas prestaciones en términos de velocidad de operación, sensibilidad, y seguridad bajo condiciones de saturación de los transformadores de intensidad y de deficiencias del canal de comunicaciones.

#### **1.4.-Métodos de localización de faltas**

##### *1.4.1.-Requerimientos que debe presentar un localizador de faltas*

Un dispositivo capaz de determinar la localización física de la falta tiene diferentes requerimientos que un relé de protección detector de faltas:

-La velocidad para determinar la localización de la falta está orientada a operadores humanos (segundos o minutos), mientras que los relés de protección normalmente necesitan detectar el cortocircuito en un intervalo de entre 10 y 50 ms. Por ello, se puede hacer uso de información adicional y de técnicas numéricas más exigentes y lentas.

-Se puede seleccionar una mayor ventana de datos para reducir errores.

-Se realiza la transmisión de datos a un sitio remoto usando comunicaciones de datos de baja velocidad o sistemas SCADA (*supervisory control and data acquisition*).

-Se puede lograr una mayor precisión en el cálculo con fasores de tensión e intensidad usando filtros digitales para estas magnitudes que podrían introducir un inaceptable retardo para aplicaciones de protección.

-Se requiere una alta precisión en la localización de la falta para realizar un despacho eficiente de los grupos de reparación de las líneas de transmisión. Una mayor precisión en la localización de la falta supone ahorrar tiempo en la reparación de la zona afectada de la línea y reducir gastos de grupos de mantenimiento buscando en condiciones climáticas adversas o sobre terrenos abruptos.

##### *1.4.2.-Obtención de los parámetros de la línea*

La precisión en la localización de la falta basada en la estimación de las impedancias de línea dependerá de la precisión de las impedancias calculadas. El método de cálculo más común se basa en las ecuaciones desarrolladas por J.R. Carson, publicadas en 1926.

Un programa típico de cálculo de cortocircuitos basado en estas ecuaciones utiliza impedancias de línea de corta o media longitud obtenidas de cálculos basados en una serie de simplificaciones, como la transposición completa de la línea y su homogeneidad. Los únicos detalles significativos a añadir a estos modelos serían los efectos de la impedancia homopolar mutua entre tramos paralelos de línea.

Los resultados obtenidos con estos modelos de impedancia para determinar la coordinación de relés y realizar análisis postfalta son bastante aceptables. Sin embargo, habría que estudiar en cada caso si las impedancias calculadas son suficientes para obtener el nivel deseado de precisión en la localización de faltas.

Otro método para determinar los parámetros de las impedancias de línea es a través de la medida directa de las tensiones e intensidades de circuito abierto y de cortocircuito. La precisión es similar a la obtenida con cálculos basados en las ecuaciones de Carson, pero este método requiere equipos especiales para llevar a cabo las pruebas.

Un tercer método implica la estimación de los parámetros de línea a través de la solución de las ecuaciones de una red de dos puertos basada en medidas de fasores sincronizadas obtenidas a partir de medidas directas de un relé digital o de un registrador de faltas. El uso de pruebas controladas para obtener los datos y la utilización de un elevado volumen de muestras obtenido por un registrador digital puede suponer la obtención de parámetros de impedancia con una gran precisión.

Para los tres métodos mencionados se requiere conocer de forma precisa la longitud de la línea. A pesar de la precisión de los parámetros de impedancia de la línea, la precisión en la localización de la falta dependerá de la técnica de localización empleada, del volumen de muestra de los datos recogidos y de la presencia de variables desconocidas, en especial del valor de la resistencia de falta.

### *1.4.3.-Técnicas de localización de faltas basadas en la impedancia vista desde en un único terminal. Uso de magnitudes de lazo*

Mediante estas técnicas se calcula la localización de la falta a partir de la impedancia aparente de la línea vista desde uno de los terminales de la línea.

Si se asume que la resistencia de falta tiene un valor nulo, se puede estimar la localización de la falta utilizando las denominadas magnitudes de lazo (ver Capítulo 4).

Una estimación correcta de la localización de la falta basada en la impedancia vista desde un terminal, sin embargo, es afectada por muchos factores no representados por las ecuaciones de estos modelos, entre los que se encuentran: el efecto combinado de la corriente de carga y la resistencia de falta (efecto de la reactancia); la identificación imprecisa del tipo de falta; la incertidumbre sobre el valor de los parámetros de la línea, en particular sobre el valor de la impedancia homopolar; precisión insuficiente del modelo de línea; presencia de bobinas y condensadores en paralelo en la línea; desequilibrios en el flujo de cargas; errores de medida y el sistema de filtrado necesario para extraer los fasores de corriente y tensión de cada fase.

La información requerida por el equipo necesario para implementar este tipo de técnicas, constituido por relés basados en microprocesadores, incluye las tensiones y corrientes fase-tierra de cada fase, y debe ser conocido con precisión el tipo de falta. Además, algunos métodos requieren conocer datos de la carga existente antes de la ocurrencia de la falta.

### *1.4.4.-Técnicas de localización de faltas basadas en la utilización de datos procedentes de dos terminales*

Los métodos de cálculo de localización de la falta usando datos de dos terminales son fundamentalmente similares a los métodos que utilizan datos de un único terminal, excepto por el hecho de que a través de los primeros existen formas de minimizar o eliminar el efecto de la resistencia de falta y otros factores que impiden obtener una

precisión adecuada en los cálculos desarrollados. Por lo tanto, la precisión de los métodos de localización de falta basados en datos de dos terminales es superior.

En estos métodos el tipo de falta no necesita ser calculado. Por este motivo, las componentes de secuencia directa se utilizan en mayor medida que las componentes homopolares, eliminando de esta forma los efectos adversos que introducen estas componentes en los cálculos de la localización de la falta.

La principal desventaja es el hecho de que los datos provenientes de los dos terminales deben ser recogidos en un único lugar para ser analizados, mientras que en los métodos de localización de un solo terminal los datos pueden ser recogidos en el propio terminal por el relé u otro dispositivo registrador de datos.

Para una localización de la falta efectiva con datos de dos terminales se requieren modos de obtener los datos de los fasores de corrientes e intensidades a partir de dispositivos electrónicos situados en ambos extremos de la línea. Estos dispositivos, como los propios relés de corriente diferencial, deben ser capaces de procesar y sincronizar los datos referidos y de mantener una comunicación efectiva entre ellos o entre ellos y un receptor de datos centralizado.

Estas técnicas de localización, por las razones anteriores, requieren tiempos mayores, pero la velocidad en la localización de la falta, como ya se ha señalado, no es crítica. Una respuesta en segundos o minutos sería adecuada.

El equipo requerido en este caso, además de relés basados en microprocesadores, incluye equipos de comunicaciones para transmitir datos a un receptor central de datos o al otro extremo de la línea. Además, es importante contar con personal técnico con ordenadores y herramientas de software en el sitio central de recepción de datos para realizar análisis y calcular la localización de la falta.

Además de las tensiones y corrientes fase-tierra, los datos que requieren los equipos están relacionados con la sincronización temporal entre las medidas efectuadas en ambos extremos de la línea.

## 2.- OBJETIVOS

El objetivo que se pretende alcanzar con la realización de este trabajo es el de programar un algoritmo localizador de faltas, capaz de calcular con cierta precisión el lugar en el que ocurre un cortocircuito en una línea de transmisión de electricidad de tres terminales, partiendo de tensiones e intensidades de cortocircuito como variables de entrada.

El funcionamiento del algoritmo referido se apoya en un desarrollo teórico previo mediante el cual se obtienen las expresiones matemáticas que intervienen en el mismo. Este desarrollo tiene en cuenta diversas técnicas de localización de faltas existentes en la actualidad, basadas en la utilización de datos recopilados en uno o varios de los terminales de una línea.

Para verificar el funcionamiento del algoritmo localizador de faltas, se simula una situación de cortocircuito en una línea utilizada como modelo. Este modelo de línea es limitado, debido a que conlleva una serie de simplificaciones. Por ello, la comprobación del funcionamiento del algoritmo se centra más en la validez de las ecuaciones utilizadas en el mismo y de su estructura que en el nivel de precisión que es capaz de alcanzar en el cálculo de la localización de la falta.

Por otra parte, la versión del algoritmo desarrollado en este trabajo no sería definitiva para su utilización en situaciones de cortocircuito reales en una línea multiterminal. Por el contrario, sería una versión base sobre la que aplicar mejoras que, aumentando su complejidad, elevarían también el nivel de precisión en el cálculo de la localización de un cortocircuito ocurrido en la línea sobre la que estuviese actuando el algoritmo.



### 3.- CÁLCULO DE TENSIONES E INTENSIDADES DE CORTOCIRCUITO. RED MODELO.

Como paso previo al desarrollo del algoritmo localizador de faltas y de las fórmulas que intervienen en el mismo, se va a explicar el método de cálculo utilizado para obtener las tensiones e intensidades que actúan como entradas del localizador de faltas cuando ocurre un cortocircuito en un punto intermedio de la línea.

El valor de estas magnitudes determinará la evaluación de la distancia de falta a partir de una serie de expresiones que relacionan los parámetros que serían medidos en los extremos de la línea (tensión e intensidades) con los que se desean obtener (distancia y resistencia de falta), las cuales serán desarrolladas en los apartados siguientes.

Los cálculos mencionados para obtener las tensiones e intensidades de falta se van a aplicar a una serie de situaciones de falta en una línea de tres terminales de parámetros determinados que será usada posteriormente como modelo base para probar el algoritmo localizador de faltas.

Las corrientes y tensiones de falta calculadas servirán para comprobar algunos aspectos básicos del funcionamiento del algoritmo, como puede ser la validez de las fórmulas utilizadas en el mismo para cada tipo de cortocircuito en particular y la precisión en la localización de la falta.

#### 3.1.-Teorema de Fortescue

En este subapartado se pretende presentar el teorema de las componentes simétricas, el cual fue desarrollado en 1918 por D. L. Fortescue en su obra *Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks*. Este teorema es uno de los más importantes de la ingeniería eléctrica y se utiliza en el desarrollo de todos los apartados de este trabajo, tanto en las explicaciones teóricas como en las aplicaciones prácticas de análisis de cortocircuitos.

El teorema de Fortescue se aplica a la resolución de redes polifásicas, para soluciones analíticas o analizadores de redes. Sirve para cualquier sistema polifásico desequilibrado en el cual  $n$  fasores relacionados entre sí pueden descomponerse en  $n$  sistemas de vectores equilibrados (componentes simétricos).

En un sistema trifásico que se encuentra normalmente equilibrado, las condiciones de desequilibrio que una falta provoca ocasionan, por lo general, que haya corrientes y tensiones desequilibradas en cada una de las tres fases. Si las corrientes y tensiones están relacionadas por impedancias constantes, se dice que el sistema es lineal y se puede aplicar el principio de superposición. La respuesta en tensión del sistema lineal a las corrientes desequilibradas se puede determinar al considerar la respuesta separada de los elementos individuales a las componentes simétricas de las corrientes.

El método consiste en determinar las componentes simétricas de las corrientes cuando ocurre un cortocircuito, y luego encontrar las corrientes y tensiones en diversos puntos del sistema. Su aplicación más importante es el cálculo de faltas desequilibradas en sistemas trifásicos simétricos, en condiciones de régimen permanente, aunque con una sola falta simultánea por vez. Este caso se ajusta a las condiciones determinadas para la simulación del algoritmo desarrollado en el Capítulo 6.



Básicamente, se trata de una transformación de variables, donde se trabaja con un juego de variables nuevas  $i'$  para facilitar la resolución de las variables primitivas  $i$ . Si llamamos  $C$  a la matriz de transformación, queda:

$$i' = C \cdot i$$

En general, los “circuitos de secuencia” son simples y se podrán expresar en formulación impedancia (a veces admitancia). Para su resolución se deberá aplicar el teorema de Thevenin o el de Norton.

### 3.1.1.-Relación entre magnitudes simétricas y de fase

De acuerdo con el teorema de Fortescue, tres magnitudes de fase desequilibradas de un sistema trifásico se pueden descomponer en tres sistemas equilibrados de fasores. Los conjuntos equilibrados de componentes simétricas son:

- Componentes de secuencia directa, que consisten en tres fasores de igual magnitud desfasados uno de otro por una fase de  $120^\circ$  y que tienen la misma secuencia de fase que las fases originales.
- Componentes de secuencia inversa, que consisten en tres fasores iguales en magnitud, desplazados en fase uno de otro en  $120^\circ$  y que tienen una secuencia de fase contraria a las fases originales.
- Componentes de secuencia homopolar, que consisten en tres fasores iguales en magnitud y con un desplazamiento de fase cero entre ellos.

La secuencia natural de fases:  $a, b, c$  se asume de modo que la secuencia directa sea  $abc$  para realizar todos los cálculos con componentes simétricas en este y en los posteriores capítulos. Para designar a las componentes de secuencia directa, inversa y homopolar se utilizarán los subíndices  $0, 1, 2$ , respectivamente.

Nota: de aquí en adelante las magnitudes que corresponden a números complejos se designan con un subrayado, como por ejemplo la tensión compleja  $\underline{U}$ .

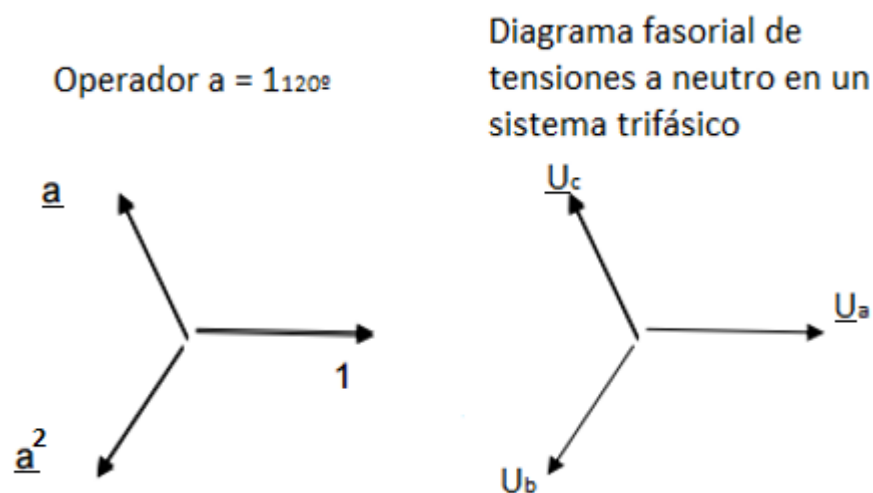


Figura 2: Operador  $a$  y secuencia natural de fases. Fuente: Elaboración propia

Trabajando con fasores, la transformación de Fortescue clásica es:

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{3}(\underline{U}_a + \underline{U}_b + \underline{U}_c) \quad \text{Homopolar}$$

$$\underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_a + \underline{a}\underline{U}_b + \underline{a}^2\underline{U}_c) \quad \text{Directa} \quad (\text{respecto a la fase } a)$$

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_a + \underline{a}^2\underline{U}_b + \underline{a}\underline{U}_c) \quad \text{Inversa}$$

Y para pasar de componentes simétricas a componentes de fase:

$$\underline{U}_a = (\underline{U}_0 + \underline{U}_1 + \underline{U}_2)$$

$$\underline{U}_b = (\underline{U}_0 + \underline{a}^2\underline{U}_1 + \underline{a}\underline{U}_2)$$

$$\underline{U}_c = (\underline{U}_0 + \underline{a}\underline{U}_1 + \underline{a}^2\underline{U}_2)$$

Y de forma matricial se puede escribir:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{pmatrix} \quad \text{ó} \quad [\underline{U}_{012}] = [\underline{A}^{-1}][\underline{U}_{abc}]$$

La anterior expresión es la transformación de Fortescue inversa. La transformación de Fortescue directa es la siguiente:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{pmatrix} \quad \text{ó} \quad [\underline{U}_{abc}] = [\underline{A}][\underline{U}_{012}]$$

Siendo  $\underline{A}$  la matriz de transformación para pasar de componentes simétricas a componentes de fase.

El anterior desarrollo corresponde a la descomposición de un sistema asimétrico en tres sistemas simétricos, de los cuales sólo es necesario definir las componentes de una sola fase (fase de referencia, fase  $a$ ), para luego hallar las demás componentes.

Las corrientes de una secuencia determinada sólo dan lugar a caídas de tensión de la misma secuencia en circuitos conectados, ya sea en estrella o triángulo, con impedancias simétricas en cada fase. Este resultado, que es el de mayor importancia, permite dibujar tres circuitos equivalentes de secuencia monofásicos que, al ser considerados de manera simultánea, contienen la misma información que el circuito original.

Las tensiones en los circuitos de secuencia directa e inversa pueden considerarse como medidos respecto a la tierra o al neutro del sistema. El mismo desarrollo puede aplicarse para las intensidades.

### 3.2.-Esquema de la red utilizada como modelo

La red que se usará como modelo para simular el algoritmo localizador de faltas la constituye una línea de tres terminales.

En algunos de los siguientes capítulos, se empleará como modelo una línea de dos terminales por su mayor simplicidad para desarrollar expresiones complejas, necesarias para obtener las magnitudes de falta buscadas en cada caso (tensiones, intensidades, distancias e impedancias).

### 3.- Cálculo de tensiones e intensidades de cortocircuito. Red modelo

Un esquema de la línea de tres terminales considerada es el que puede verse en la Figura 3:

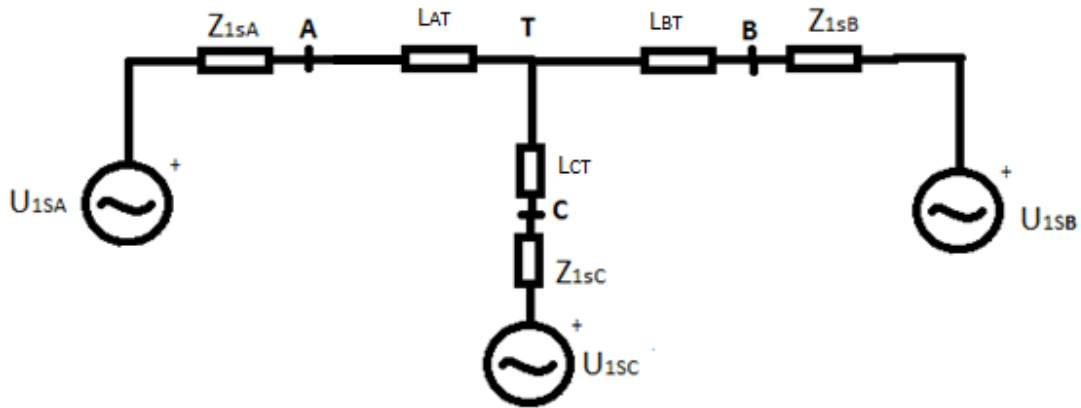


Figura 3: Esquema de la línea de 3 terminales considerada como modelo en este trabajo. Fuente: elaboración propia

La red de prueba modelada tiene una tensión de 110 kV (tensión fase-fase) e incluye los tres tramos de línea, con las siguientes longitudes para cada tramo:

- Longitud del tramo AT: 100 km.
- Longitud del tramo BT: 80 km
- Longitud del tramo T-C: 50 km.

Las impedancias de secuencia directa y de secuencia homopolar de la línea tienen los siguientes valores (para la red de secuencia inversa se toman los mismos valores que para la red de secuencia directa):

$$\underline{Z}'_{1L} = (0.0276 + j0.3151), \quad \underline{Z}'_{0L} = (0.275 + j1.0265); \left( \frac{\Omega}{km} \right).$$

Y las capacidades de línea correspondientes:

$$\underline{C}_{1L} = 13 \frac{nF}{km}, \quad \underline{C}_{0L} = 8.5 \frac{nF}{km}$$

Las impedancias de las fuentes equivalentes de los extremos de los diferentes tramos de la línea también han sido incluidas y presentan los valores que se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{1SA} &= (0.65125 + j3.693)\Omega, & \underline{Z}_{0SA} &= (1.159 + j6.5735)\Omega, \\ \underline{Z}_{iSB} &= 2\underline{Z}_{iSA}, & \underline{Z}_{iSC} &= 3\underline{Z}_{iSA} \end{aligned}$$

La existencia de un flujo de cargas en condiciones de prefault en la red modelada se considera asumiendo un desfase de  $-30^\circ$  en la fuente equivalente de tensión del terminal B y un desfase de  $-15^\circ$  en la fuente del terminal C, con respecto a la fuente equivalente detrás de la barra A (desfase de  $0^\circ$ ).

El circuito equivalente monofásico de la línea trifásica estudiada con los parámetros mencionados para la red de secuencia directa, es el representado en la Figura 4.

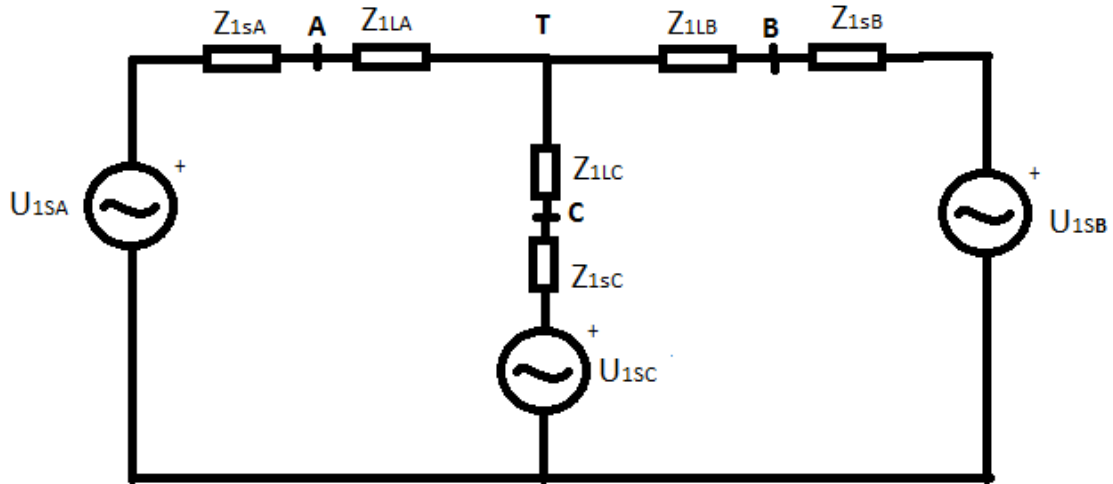


Figura 4: Circuito equivalente de la red modelo usada para la comprobación del funcionamiento del algoritmo localizador de faltas. Fuente: elaboración propia

Para el caso de una línea de dos terminales, el circuito equivalente sería el mismo que el anterior, solo que se eliminaría el tramo de línea T-C y las impedancias de línea  $Z_{1LA}$  y  $Z_{1LB}$  pasarían a ser una impedancia única  $Z_{1L}$ .

### 3.3.-Cálculo de cortocircuitos usando $Z_{barra}$

El cálculo de las tensiones y corrientes de falta se ha llevado a cabo utilizando la matriz equivalente de impedancias,  $Z_{barra}$ , del sistema representado en el circuito equivalente de la Figura 4.

Se estudiará como ejemplo un caso particular en el que se produce una falta trifásica en el tramo T-B de la línea de tres terminales, concretamente en un punto P situado a una distancia  $d$  (en tanto por uno o, de aquí en adelante, en *por unidad*, *p.u.*) del extremo B.

Considerando una variación lineal de la impedancia de la línea con la distancia, la impedancia que existe entre el extremo B y el punto P es igual a  $d * Z_{1LB}$ . El circuito equivalente de secuencia directa de la línea quedaría, en estas condiciones, como se muestra en la Figura 5:

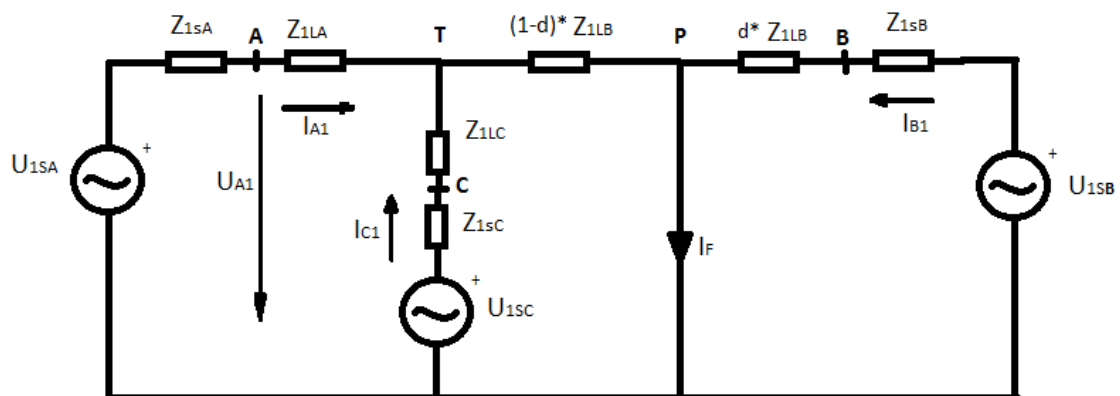


Figura 5: Diagrama de circuito de la línea de tres terminales bajo falta en el tramo T-B, para la componente simétrica directa. Fuente: elaboración propia

### 3.- Cálculo de tensiones e intensidades de cortocircuito. Red modelo

Desde el punto P en el que ocurre el cortocircuito, el resto del sistema puede verse como un circuito activo en el que están presentes las tensiones y corrientes que existían antes de producirse la falta (Figura 4). Estas tensiones e intensidades se representan con el superíndice °, como la tensión  $\underline{U}_P^\circ$ , y se obtienen resolviendo el circuito activo visto desde el punto P (Figura 6), donde A, B y C son los terminales de la línea.

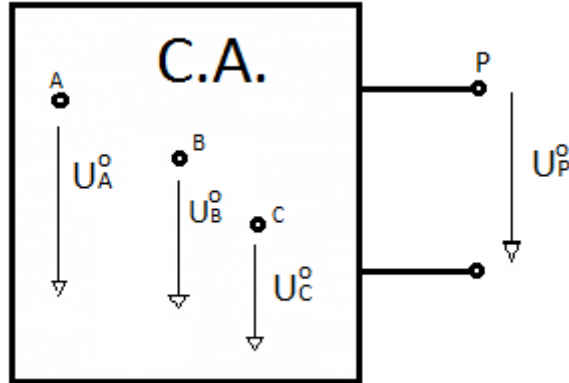


Figura 6: Circuito activo visto desde el punto P en condiciones de prefalta. Fuente: elaboración propia

Cuando ocurre un cortocircuito en el punto P, la tensión en este punto es igual a cero y entre el punto P y el punto de referencia del circuito circula la corriente de falta  $\underline{I}_F$ .

Esta situación equivale a considerar otra similar en la que entre el punto P y la referencia existen dos fuentes de tensión iguales de valor igual a la tensión prefalta,  $\underline{U}_P^\circ$ , pero de sentidos opuestos, como se puede observar en la Figura 7.

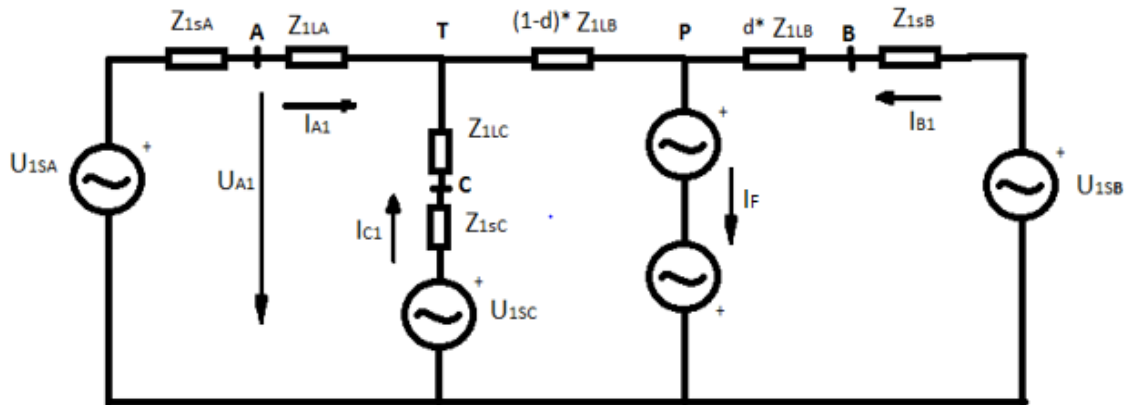


Figura 7: Circuito equivalente en situación de falta con fuentes iguales y de distinto signo en el punto donde ocurre la falta. Fuente: elaboración propia

Aplicando el teorema de superposición al circuito anterior, se puede dividir éste en dos circuitos: uno de ellos con una fuente de tensión entre el punto P y la referencia de valor  $\underline{U}_P^\circ$  en el que están presentes las demás fuentes de tensión, y otro en el que la única fuente de tensión que hay es la de valor  $-\underline{U}_P^\circ$  en el punto de falta (Figura 8).

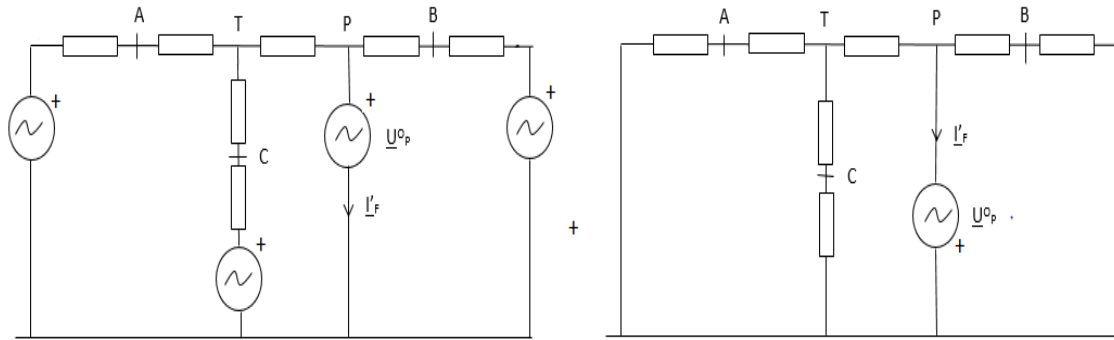


Figura 8: División del circuito en situación de falta en dos circuitos por el teorema de superposición. Fuente: elaboración propia

La suma de las corrientes de falta de cada uno de los circuitos será igual a la corriente de falta total:

$$I_F' + I_F'' = I_F$$

Como puede comprobarse, el circuito de la izquierda de la Figura 8 es equivalente al circuito que representa la situación inicial, antes de que ocurriese la falta, puesto que el circuito visto desde el punto P no ha variado y la tensión en este punto también es la misma que la que había antes de producirse el cortocircuito.

De esta manera, se puede afirmar que la intensidad  $I_F'$  es nula y la intensidad de falta total es igual a la que circula por el circuito situado a la derecha en la Figura 8.

También del circuito de la derecha se puede obtener directamente la intensidad de falta como el cociente de la tensión de prefault  $U_P^0$  y la impedancia equivalente del circuito pasivo visto desde el punto P:

$$I_F'' = \frac{U_P^0}{Z_{eq}}$$

Por el teorema de superposición se puede afirmar que las tensiones presentes en los diferentes puntos de la línea después de la ocurrencia de la falta se calculan como la suma de su valor en las condiciones que existían antes de la ocurrencia del cortocircuito y el valor que toman al introducir una fuente de tensión  $-U_P^0$  entre el punto P y el punto de referencia del circuito (condiciones representadas en los dos circuitos de la Figura 8). De esta manera, se pueden expresar las tensiones en situación de falta para las diferentes secuencias simétricas:

$$U_A = U_A^0 + U_A''$$

$$U_B = U_B^0 + U_B''$$

$$U_C = U_C^0 + U_C''$$

$$U_P = U_P^0 + U_P''$$

Las tensiones  $U''$ , que representan las variaciones en la tensión debidos a la corriente  $-I_F''$  que se inyecta en el punto P debido a la falta, se pueden obtener realizando un análisis por nudos del circuito de la derecha de la Figura 8. Como paso previo a este análisis por nudos se debe sustituir la fuente de tensión  $U_P^0$  por una fuente de intensidad de valor  $-I_F''$  con la referencia en sentido ascendente.

### 3.- Cálculo de tensiones e intensidades de cortocircuito. Red modelo

De esta manera se llega a la siguiente expresión, donde interviene la matriz de impedancias  $\underline{Z}_{\text{barra}}$ :

$$\begin{pmatrix} \underline{U}''_A \\ \underline{U}''_B \\ \underline{U}''_C \\ \underline{U}''_T \\ \underline{U}''_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Z}_{AA} & \underline{Z}_{AB} & \underline{Z}_{AC} & \underline{Z}_{AT} & \underline{Z}_{AP} \\ \underline{Z}_{BA} & \underline{Z}_{BB} & \underline{Z}_{BC} & \underline{Z}_{BT} & \underline{Z}_{BP} \\ \underline{Z}_{CA} & \underline{Z}_{CB} & \underline{Z}_{CC} & \underline{Z}_{CT} & \underline{Z}_{CP} \\ \underline{Z}_{TA} & \underline{Z}_{TB} & \underline{Z}_{TC} & \underline{Z}_{TP} & \underline{Z}_{TP} \\ \underline{Z}_{PA} & \underline{Z}_{PB} & \underline{Z}_{PC} & \underline{Z}_{PT} & \underline{Z}_{PP} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\underline{I}''_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\underline{Z}_{AP} * \underline{I}''_F \\ -\underline{Z}_{BP} * \underline{I}''_F \\ -\underline{Z}_{CP} * \underline{I}''_F \\ -\underline{Z}_{TP} * \underline{I}''_F \\ -\underline{Z}_{PP} * \underline{I}''_F \end{pmatrix}$$

La matriz de impedancias puede obtenerse de diversas maneras, como por ejemplo mediante algoritmos de construcción de  $\underline{Z}_{\text{barra}}$  o mediante triangulación. En este caso se ha obtenido a través de la inversión de la matriz de admitancias del sistema  $\underline{Y}_{\text{barra}}$ .

La matriz de admitancias del circuito equivalente de la línea cuando ocurre una falta en el punto P (Figura 5) se calcularía de la siguiente forma:

$$\underline{Y}_{\text{barra}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\underline{Z}_{1SA}} + \frac{1}{\underline{Z}_{1LA}} & 0 & 0 & -\frac{1}{\underline{Z}_{1LA}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\underline{Z}_{1SB}} + \frac{1}{\underline{Z}_{1LB}} & 0 & 0 & -\frac{1}{d\underline{Z}_{1LB}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\underline{Z}_{1SC}} + \frac{1}{\underline{Z}_{1LC}} & -\frac{1}{\underline{Z}_{1LC}} & 0 \\ -\frac{1}{\underline{Z}_{1LA}} & 0 & -\frac{1}{\underline{Z}_{1LC}} & -\frac{1}{\underline{Z}_{1LA}} - \frac{1}{\underline{Z}_{1LC}} - \frac{1}{(1-d)\underline{Z}_{1LB}} & -\frac{1}{(1-d)\underline{Z}_{1LB}} \\ 0 & -\frac{1}{d\underline{Z}_{1LB}} & 0 & -\frac{1}{(1-d)\underline{Z}_{1LB}} & -\frac{1}{d\underline{Z}_{1LB}} - \frac{1}{(1-d)\underline{Z}_{1LB}} \end{pmatrix}$$

Calculando la inversa de la matriz de admitancias se obtiene la matriz de impedancias de barra:

$$\underline{Z}_{\text{barra}} = \text{inv}(\underline{Y}_{\text{barra}})$$

La intensidad de falta  $\underline{I}''_F$  se puede hallar a través de la impedancia equivalente del circuito vista desde el punto P como se explicó más arriba, o bien mediante el término  $\underline{Z}_{PP}$  de la matriz de impedancias calculada:

$$\underline{I}''_F = -\frac{\underline{U}''_P}{\underline{Z}_{PP}}$$

Conocida la intensidad de falta  $\underline{I}''_F$ , la obtención de las tensiones  $\underline{U}''$  y de las tensiones de falta en los diferentes puntos de la línea es inmediata.

Una vez calculadas las tensiones de falta, las intensidades de falta en cada tramo de la línea,  $\underline{I}_A$ ,  $\underline{I}_B$  e  $\underline{I}_C$ , se obtienen resolviendo el circuito equivalente en situación de cortocircuito en el tramo B, representado en la Figura 5.

### 3.4.-Particularización del cálculo de tensiones e intensidades de cortocircuito para los diferentes tipos de falta

Para el caso de faltas simétricas como lo son las faltas trifásicas con y sin puesta a tierra a través de resistencia (faltas  $abc$  y  $abcg$ ), se pueden obtener las tensiones y corrientes de falta aplicando directamente el método explicado en el apartado anterior de  $Z_{barra}$  a la red de secuencia directa de la línea.

Sin embargo, en el caso de faltas asimétricas como es el caso de las faltas monofásicas y bifásicas, se deben de calcular las corrientes y tensiones de falta por separado para cada una de las secuencias (directa, inversa y homopolar). Después, se debe determinar la relación existente entre las tensiones y corrientes de cada equivalente Thevenin de las redes de secuencia simétrica para obtener la corriente de falta total.

La relación entre las corrientes y tensiones simétricas de las diferentes redes de secuencia puede representarse mediante circuitos de conexión entre estas redes. En las Figuras 9 y 10 se representan los circuitos de conexión de las redes de secuencia para los casos de falta monofásica (fase  $a$  a tierra a través de resistencia  $R_F$ ) y falta bifásica (entre fases  $b$  y  $c$ ) a través de resistencia  $R_F$ .

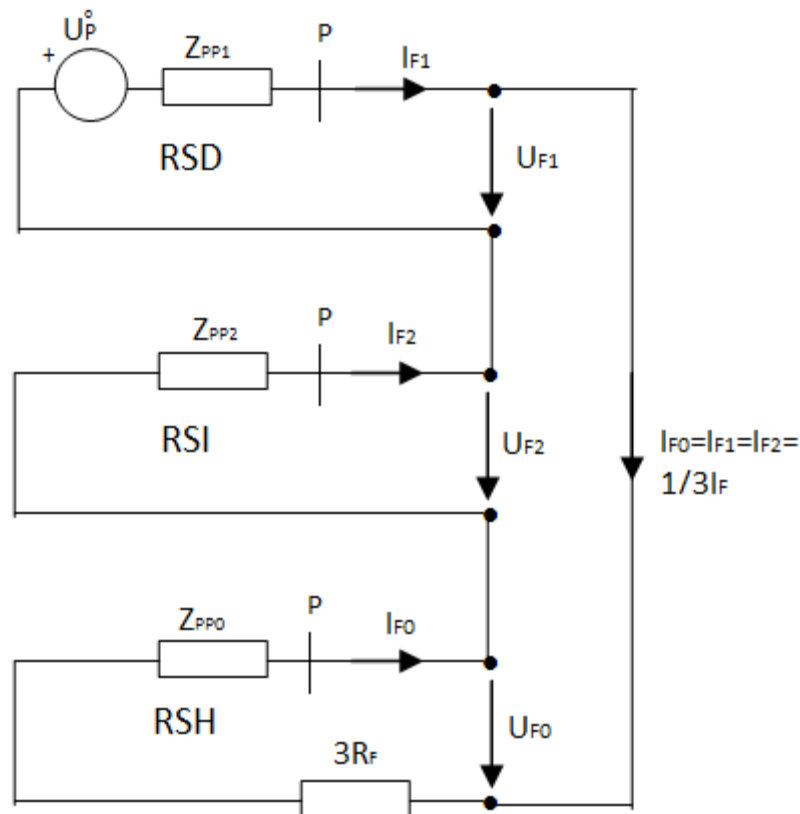


Figura 9: Conexión de los equivalentes de Thevenin de las redes de secuencia para simular una falta monofásica a tierra de la fase  $a$  en un punto  $P$  de la línea modelo considerada. Fuente: elaboración propia

Observando la conexión los equivalentes Thevenin de las redes de secuencia en una falta monofásica, se puede concluir que:



### 3.- Cálculo de tensiones e intensidades de cortocircuito. Red modelo

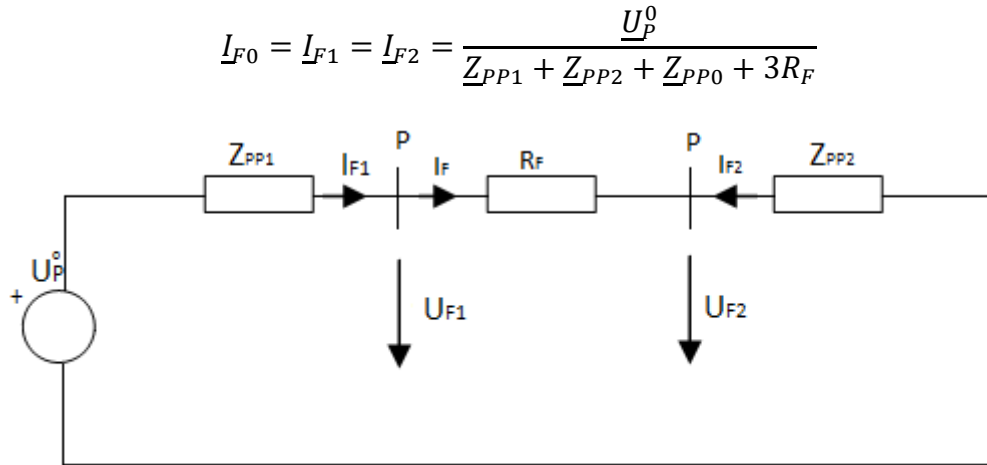


Figura 10: Conexión de los equivalentes de Thevenin de las redes de secuencia directa e inversa para una falta bifásica entre las fases b y c en el punto P de la línea en el que ocurre el cortocircuito. Fuente: elaboración propia

Y, a partir de la conexión de los equivalentes Thevenin de las redes de secuencia en una falta bifásica, se obtienen los siguientes valores para las componentes simétricas de la intensidad de falta:

$$I_{F1} = -I_{F2} = \frac{U_P^0}{Z_{PP1} + Z_{PP2} + R_F}$$

Para las demás situaciones de cortocircuito que pueden darse, como faltas entre fases y tierra en las fases b y c, faltas entre fases entre las fases a y c o entre las fases a y b y faltas bifásicas a tierra entre las diferentes fases, también se debe de llegar a las relaciones entre las magnitudes simétricas de las intensidades de falta para poder obtener dicha intensidad.

Mediante el método de cálculo explicado en este y en el anterior apartado se obtendrán, simulando la ocurrencia de un cortocircuito en una línea de tres terminales, las diferentes magnitudes simétricas y de fase de las tensiones e intensidades que serán usadas como entradas en el algoritmo localizador de faltas.

#### 4.-DESCRIPCIÓN DEL CÁLCULO DE DISTANCIA DE FALTA A TRAVÉS DE MAGNITUDES DE LAZO

El principio de funcionamiento de una protección de distancia en una línea de transporte de alta tensión se basa en la relación directa que existe entre la impedancia  $Z_{1f}$ , en ohm, vista por el relé localizador de faltas situado en uno de los extremos de la línea y la distancia  $d$ , en km, que hay desde ese extremo hasta el punto en el que ocurre el defecto. La impedancia vista por el relé se calcula a partir de las magnitudes de fase de la tensión y la intensidad del extremo de la línea ( $\underline{U}_{Af}$ ,  $\underline{I}_{Af}$ ) medidas por los transformadores de tensión y de corriente, cuyos valores de fase se transmiten al relé para que evalúe la impedancia y la distancia de falta.

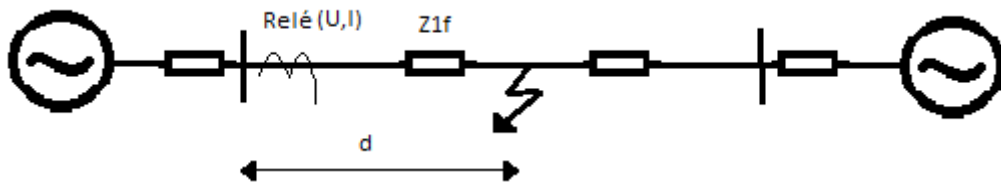


Figura 11: Esquema de línea de dos terminales con protección de distancia situada en un extremo que ve una falta que ocurre en un punto intermedio de la línea. Fuente: elaboración propia

Para llegar a las expresiones finales que relacionan las tensiones y corrientes medidas en el extremo de la línea con la distancia y la impedancia de falta, se van a desarrollar casos particulares en los que ocurren diferentes tipos de cortocircuito: bifásico y monofásico. En el presente capítulo, estas situaciones de falta se evalúan en una línea de dos terminales, por la simplicidad que presenta frente a una línea de tres terminales a la hora de desarrollar las ecuaciones buscadas.

En una primera aproximación para obtener las expresiones mencionadas, se considerará que no existe una resistencia de falta que restrinja la circulación de la corriente de falta en el lazo del cortocircuito. Posteriormente se verá el efecto que provoca la consideración de la existencia de una resistencia de falta  $R_F$ .

##### 4.1.- Magnitudes de lazo. Falta bifásica

Se considera un cortocircuito entre las fases  $b$  y  $c$  en un punto intermedio de una línea de dos terminales. Estas fases se han escogido de forma arbitraria por lo que el desarrollo siguiente es igual de válido para faltas bifásicas que se produzcan entre las fases  $a$  y  $b$  o entre las fases  $a$  y  $c$ .

Cuando se produce un cortocircuito entre las fases  $b$  y  $c$ , las redes de secuencia directa e inversa de la línea se pueden considerar, a efectos teóricos, conectadas como se aprecia en el esquema de la Figura 12:

#### 4.-Descripción del cálculo de distancia de falta a través de magnitudes de lazo

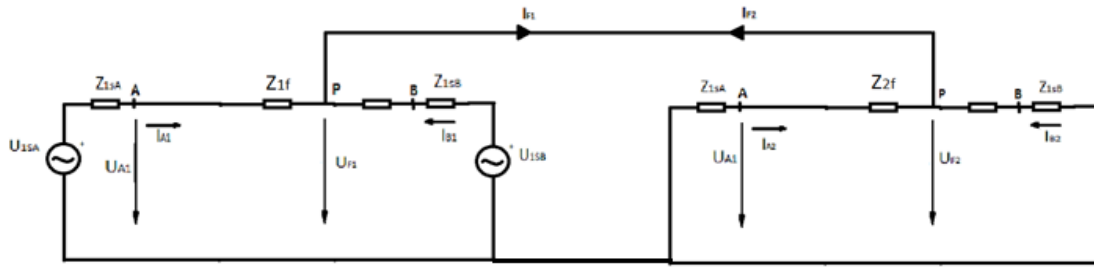


Figura 12: Conexión de las redes de secuencia directa e inversa cuando ocurre un cortocircito bifásico entre las fases b y c en un punto medio de una línea de dos terminales. Fuente: elaboración propia

Del esquema de conexión anterior se deduce que las tensiones de secuencia directa y de secuencia inversa en el extremo donde se sitúa el relé (extremo A) toman los siguientes valores:

$$\underline{U}_{A1} = \underline{Z}_{1f} \underline{I}_{A1} + \underline{U}_{F1}$$

$$\underline{U}_{A2} = \underline{Z}_{2f} \underline{I}_{A2} + \underline{U}_{F2}$$

Y, como no se considera la existencia de una resistencia de falta entre el punto en el que ocurre la falta y la referencia de tierra, podemos afirmar que  $\underline{U}_{F1} = \underline{U}_{F2}$ . Al restar las anteriores expresiones de la tensión se obtiene:

$$\underline{U}_{A1} - \underline{U}_{A2} = \underline{Z}_{1f} (\underline{I}_{A1} - \underline{I}_{A2}) \rightarrow \frac{\underline{U}_{A1} - \underline{U}_{A2}}{\underline{I}_{A1} - \underline{I}_{A2}} = \underline{Z}_{1f}$$

Por otra parte, se utilizan las siguientes relaciones existentes entre las magnitudes de fase de la tensión del extremo de línea y sus componentes simétricas, donde las componentes homopolares son nulas:

$$\underline{U}_{Aa} = \underline{U}_{A0} + \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2}$$

$$\underline{U}_{Ab} = \underline{U}_{A0} + \underline{a}^2 \underline{U}_{A1} + \underline{a} \underline{U}_{A2}$$

$$\underline{U}_{Ac} = \underline{U}_{A0} + \underline{a} \underline{U}_{A1} + \underline{a}^2 \underline{U}_{A2}$$

donde:  $\underline{a} = 1_{120^\circ}$

Restando las tensiones de las fases b y c del extremo de la línea se llega a la siguiente expresión:

$$\underline{U}_{Ab} - \underline{U}_{Ac} = (\underline{a}^2 - \underline{a})(\underline{U}_{A1} - \underline{U}_{A2})$$

Las relaciones entre las magnitudes de fase y las magnitudes simétricas de la intensidad del extremo de la línea son análogas a las existentes para la tensión. Por lo tanto, la diferencia entre las corrientes de las fases b y c queda:

$$\underline{I}_{Ab} - \underline{I}_{Ac} = (\underline{a}^2 - \underline{a})(\underline{I}_{A1} - \underline{I}_{A2})$$

Finalmente, el cociente de las dos ecuaciones anteriores es igual a la impedancia de secuencia vista por el relé entre el extremo de la línea y el punto en el que ocurre la falta:

$$\frac{\underline{U}_{Ab} - \underline{U}_{Ac}}{\underline{I}_{Ab} - \underline{I}_{Ac}} = \frac{\underline{U}_{A1} - \underline{U}_{A2}}{\underline{I}_{A1} - \underline{I}_{A2}} = \underline{Z}_{1f}$$

En la ecuación anterior, los términos  $\underline{U}_{Ab} - \underline{U}_{Ac}$  y  $\underline{I}_{Ab} - \underline{I}_{Ac}$ , que constituyen las diferencias de los fasores de las tensiones e intensidades de las fases entre las que se da el cortocircuito, se denominan tensión e intensidad de lazo, respectivamente. Esta denominación se debe a que son las magnitudes que deben conocerse para resolver el lazo (o malla) formado por el extremo de la línea, la derivación de la corriente de cortocircuito en el punto de falta y el tramo de línea que une los dos puntos.

La obtención de la localización del punto en el que ha ocurrido la falta es inmediata, ya que la impedancia anterior es proporcional a la distancia  $d$  desde el extremo de la línea en el que está situado el relé hasta el punto en el que ocurre el cortocircuito, de manera que:

$$\underline{Z}_{1f} = d * \underline{Z}'_{1L}$$

donde:

$\underline{Z}'_{1L}$  es la impedancia de secuencia directa por unidad de longitud de la línea, en ohm/km (se considera que la impedancia de secuencia inversa tiene el mismo valor).

Para faltas bifásicas a tierra entre las fases  $b$  y  $c$  (con derivación a tierra de la corriente de falta a través de impedancia nula), se llega mediante un desarrollo como el anterior, a que las tensiones e intensidades de lazo correspondientes también son, como en el caso de la falta bifásica, los términos  $\underline{U}_{Ab} - \underline{U}_{Ac}$  y  $\underline{I}_{Ab} - \underline{I}_{Ac}$ , respectivamente.

#### 4.2.- Magnitudes de lazo. Falta monofásica

Se considera en este caso la ocurrencia de un cortocircuito entre la fase  $a$  y tierra, sin resistencia de falta entre el punto en el que ocurre el cortocircuito y la referencia a tierra. La elección de la fase  $a$  es arbitraria, por lo que este caso puede extenderse a faltas monofásicas en las fases  $b$  y  $c$ .

La relación de las componentes simétricas de las tensiones e intensidades que aparecen en el extremo de la línea donde se sitúa el relé puede verse en el esquema de conexión entre las redes de secuencia directa, inversa y homopolar (RSD, RSI y RSH, respectivamente) para una falta monofásica.

Para el caso de la falta monofásica, la tensión y la corriente homopolares no son nulas, por lo que las componentes simétricas de la tensión en el extremo de la línea son:

$$\underline{U}_{A1} = \underline{Z}_{1f} \underline{I}_{A1} + \underline{U}_{F1}$$

$$\underline{U}_{A2} = \underline{Z}_{2f} \underline{I}_{A2} + \underline{U}_{F2}$$

$$\underline{U}_{A0} = \underline{Z}_{0f} \underline{I}_{A0} + \underline{U}_{F0}$$

La tensión en la fase  $a$  durante la falta es la suma de las anteriores componentes simétricas y del esquema de conexión entre las redes de secuencia representado en la Figura 9, suponiendo  $R_F = 0$ , se determina que dicha tensión tiene un valor nulo, por lo que:

$$\underline{U}_{F1} + \underline{U}_{F2} + \underline{U}_{F0} = 0$$

En consecuencia, la tensión de la fase  $a$  en el extremo A de la línea,  $\underline{U}_{Aa}$ , quedaría de la siguiente manera:

#### 4.-Descripción del cálculo de distancia de falta a través de magnitudes de lazo

$$\underline{U}_{Aa} = \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} = \underline{Z}_{1f}(\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2}) + \underline{Z}_{0f} \underline{I}_{A0}$$

Manipulando la anterior expresión para que aparezca la corriente de fase  $\underline{I}_{Aa}$  obtenemos:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{Aa} &= \underline{Z}_{1f}(\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0}) + (\underline{Z}_{0f} - \underline{Z}_{1f}) \underline{I}_{A0} = \underline{Z}_{1f} \underline{I}_{Aa} + (\underline{Z}_{0f} - \underline{Z}_{1f}) \underline{I}_{A0} \\ &= \underline{Z}_{1f} \left[ \underline{I}_{Aa} + \frac{\underline{Z}_{0f} - \underline{Z}_{1f}}{\underline{Z}_{1f}} \underline{I}_{A0} \right] = \underline{Z}_{1f} [\underline{I}_{Aa} + K_0 \underline{I}_{A0}] \end{aligned}$$

El coeficiente  $K_0 = \frac{\underline{Z}_{0f} - \underline{Z}_{1f}}{\underline{Z}_{1f}}$  es un factor que compensa la presencia de la corriente homopolar en el caso de la falta monofásica. Los valores típicos que adopta este factor de compensación en líneas de alta tensión están entre 1.5 y 2.5, siendo un valor típico el de 2, que corresponde al caso en el que  $\underline{Z}'_0 = 3\underline{Z}'_1$ .

En el caso de una falta monofásica las tensiones e intensidades de lazo serían, por tanto,  $\underline{U}_{Aa}$  y  $\underline{I}_{Aa} + K_0 \underline{I}_{A0}$ , respectivamente.

Por último, para una falta trifásica sin resistencia de falta, las magnitudes de lazo pueden ser las mismas que se han obtenido tanto para faltas bifásicas como para faltas monofásicas, debido a su condición de falta simétrica.

#### 4.3.-Magnitudes de lazo. Resumen de situaciones particulares de falta

Resumiendo, se puede afirmar que las magnitudes de lazo son aquellas tensiones e intensidades del extremo de una línea en la que ocurre un cortocircuito, formadas por relaciones entre las tensiones e intensidades de fase, que se emplean para determinar la impedancia existente entre el extremo de la línea y el punto en el que ocurre la falta y, a partir de dicha impedancia, la distancia al punto de falta.

La siguiente tabla recoge las tensiones e intensidades de lazo para los diferentes casos particulares de cortocircuito que pueden darse en una línea, obtenidas a partir del desarrollo realizado en este capítulo, particularizado para cada tipo de cortocircuito:

Tipo de falta	Magnitudes de lazo
<b>Bifásica, bifásica a tierra y trifásica</b>	$\underline{U}_a - \underline{U}_b, \quad \underline{I}_a - \underline{I}_b$ $\underline{U}_b - \underline{U}_c, \quad \underline{I}_b - \underline{I}_c$ $\underline{U}_a - \underline{U}_c, \quad \underline{I}_a - \underline{I}_c$
<b>Monofásica y trifásica</b>	$\underline{U}_a, \quad \underline{I}_a + K_0 \underline{I}_0$ $\underline{U}_b, \quad \underline{I}_b + K_0 \underline{I}_0$ $\underline{U}_c, \quad \underline{I}_c + K_0 \underline{I}_0$

Tabla 1: Magnitudes de lazo para los diferentes tipos de falta

#### 4.4.- Comprobación del error introducido al considerar resistencias de falta en el cálculo de las distancias de falta a partir de las magnitudes de lazo

En la Tabla 2 se recopilan los datos referentes a las distancias (en km) desde el extremo A, donde se sitúa el relé y se miden las tensiones e intensidades de fase que aparecen

al producirse la falta, hasta el punto de la línea en el que ocurre el cortocircuito, para diferentes tipos de falta.

Estas distancias han sido calculadas a partir de la impedancia del tramo de línea que forma el lazo existente entre el extremo de la línea y el punto de falta, obtenida a partir de las tensiones e intensidades de lazo correspondientes, como fue explicado en los apartados anteriores.

A su vez, las tensiones e intensidades de fase utilizadas para calcular la distancia de falta, se han obtenido utilizando el método de cálculo de faltas descrito en el Capítulo 3, simulando los diferentes tipos de cortocircuito en un punto situado a 50 km de la línea modelo del Apartado 3.2, pero sin considerar el tramo C (lo que equivale a considerar una línea de dos terminales).

Tipo de falta	Distancia real	Calculada sin $R_F$	Calculada con $R_F = 5 \text{ ohm}$	Calculada con $R_F = 10 \text{ ohm}$
a-g	50	50.00	49.5445-15.225i	49.1905 -28.7795i
b-c	50	50.00	48.1629 -13.2069i	46.6818 -25.1276i
b-c-g	50	50.00	46.6818 -25.1276i	44.5104 -45.7846i
a-b-c-g	50	50.00	46.6818 -25.1276i	44.5104 -45.7846i

*Tabla 2: Distancias en km al punto de falta calculadas a partir de magnitudes de lazo considerando y sin considerar resistencias de falta, para diferentes tipos de falta*

Como puede observarse en la tabla anterior, el error cometido al calcular la distancia desde el extremo de la línea en el que se sitúa el relé hasta el punto de falta a partir de las magnitudes de lazo cuando no existe una resistencia que se oponga a la circulación de la corriente de falta, es nulo.

Sin embargo, cuando se considera una resistencia de falta, los cálculos de la distancia al punto en el que ocurre el cortocircuito ya no son exactos. La distancia calculada en estos casos resulta ser un número complejo que no se ajusta a la realidad.

Atendiendo a la parte real de las distancias calculadas, se puede observar que el error en la distancia calculada es menor para el caso en el que se considera una resistencia de 5 ohmios para la corriente de falta que cuando se toma un valor de 10 ohmios.

También se puede concluir que el cálculo de la distancia de falta para el caso de una falta monofásica cuando se consideran resistencias de falta presenta un error menor que para el resto de los tipos de falta considerados.

El error en el cálculo de la distancia es más significativo para los casos de faltas bifásicas a tierra y faltas trifásicas (mismos resultados para ambos casos), pudiendo llegar a haber, en el caso de una resistencia de falta de 10 ohmios, una diferencia de 5.5 km (un 11 % de la distancia al punto de falta) entre el valor real de la distancia y el valor calculado a partir de las magnitudes de lazo.

En definitiva, para poder calcular un valor preciso de la distancia de falta el método de cálculo directo a través de las magnitudes de falta visto en este capítulo no es adecuado, debido a que, en general, en situaciones reales de cortocircuito siempre existirá una resistencia de falta entre el punto de falta y la referencia de tierra.

## 5.- MÉTODO DE LOS RELÉS DIFERENCIALES EN LÍNEA DE 2 TERMINALES

### 5.1.- Descripción de la ecuación básica de lazo de falta a partir de casos particulares

En este apartado se pretende demostrar la ecuación básica de lazo de falta que relaciona las tensiones e intensidades de lazo, obtenidas a partir de los valores medidos en los extremos de la línea de las magnitudes de fase, con la distancia al punto de falta y la resistencia de falta.

Al igual que en el capítulo anterior, en este capítulo también se realiza el desarrollo de las ecuaciones tomando como modelo base una línea de dos terminales, debido a su menor complejidad de cara al desarrollo matemático.

Se considera el caso de una línea de dos terminales, en la que ocurre un cortocircuito a tierra a través de una resistencia en un punto P situado entre sus extremos, tal y como se representa en el esquema de la Figura 13. Entre el extremo de la línea en el que se sitúa el relé (extremo A) y el punto en el que ocurre la falta, se forma un lazo de falta.

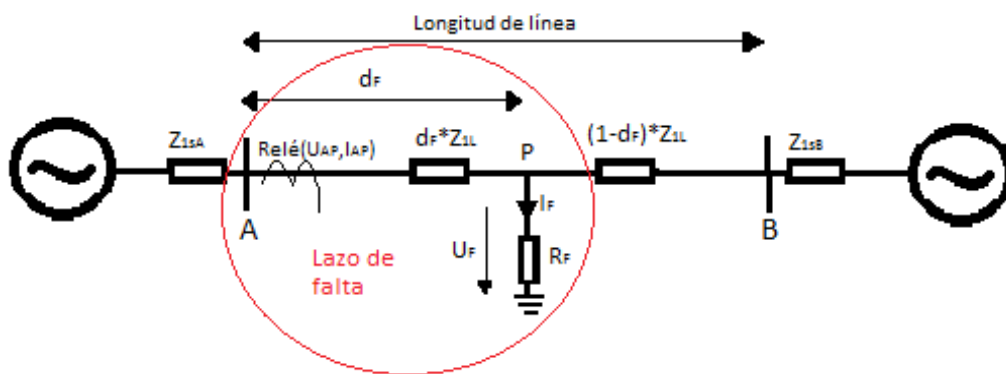


Figura 13 Lazo de falta en situación de cortocircuito en línea de 2 terminales. Fuente: elaboración propia

Observando la Figura 13, se puede determinar que la ecuación básica de lazo de falta presenta la siguiente forma final:

$$\underline{U}_{Ap} = d_F \underline{Z}_{1L} \underline{I}_{Ap} + R_F \underline{I}_F$$

donde:

$d_F$  y  $R_F$  son la distancia y la resistencia de falta, en p.u. y en ohm, respectivamente.

$\underline{Z}_{1L}$  es la impedancia de secuencia directa del tramo de línea en el que ocurre la falta (tramo A-B), en ohm.

$\underline{I}_F$  es la intensidad de lazo de falta que circula entre el punto de falta y tierra, en amperios.

$\underline{U}_{Ap}$  y  $\underline{I}_{Ap}$  son la tensión y la intensidad de lazo que aparecen en el extremo A de la línea cuando ocurre un cortocircuito en un punto intermedio de la línea, en voltios y en amperios, respectivamente.

Puede verse en la ecuación anterior que en este caso sí que se tiene en cuenta la resistencia de falta  $R_F$ , a diferencia de lo que ocurría en el método de cálculo de la distancia de falta a partir de las magnitudes de lazo presentado en el Capítulo 4, por lo que esto debería conducir a resultados más precisos en la evaluación de la distancia de falta.

Las magnitudes de lazo  $\underline{I}_{FA}$ ,  $\underline{U}_{Ap}$  y  $\underline{I}_{Ap}$  se obtienen a partir de las componentes simétricas de la tensión e intensidad del extremo de la línea, por una parte, y de la intensidad de falta por otra, multiplicadas por unos coeficientes que varían para cada situación de falta, de tal manera que:

$$\underline{U}_{Ap} = \underline{a}_0 \underline{U}_{A0} + \underline{a}_1 \underline{U}_{A1} + \underline{a}_2 \underline{U}_{A2}$$

$$\underline{I}_{Ap} = \underline{a}_0 \underline{I}_{A0} + \underline{a}_1 \underline{I}_{A1} + \underline{a}_2 \underline{I}_{A2}$$

$$\underline{I}_F = \underline{a}_{F0} \underline{I}_{F0} + \underline{a}_{F1} \underline{I}_{F1} + \underline{a}_{F2} \underline{I}_{F2}$$

donde:

$\underline{U}_{A0}, \underline{U}_{A1}, \underline{U}_{A2}, \underline{I}_{A0}, \underline{I}_{A1}, \underline{I}_{A2}$  son las componentes simétricas de la tensión y de la intensidad en el extremo A de la línea cuando ocurre un cortocircuito en un punto medio de la línea.

$\underline{I}_{F0}, \underline{I}_{F1}, \underline{I}_{F2}$  son las componentes simétricas de la intensidad de falta que aparece en el punto en el que ocurre el cortocircuito.

$\underline{a}_0, \underline{a}_1, \underline{a}_2$  son los coeficientes de ponderación que multiplican a las componentes simétricas de la tensión y la intensidad del extremo de línea para formar las magnitudes de lazo.

$\underline{a}_{F0}, \underline{a}_{F1}, \underline{a}_{F2}$  son los coeficientes de ponderación que multiplican a las magnitudes simétricas de la intensidad de falta en el punto en el que ocurre el cortocircuito para formar la intensidad de falta de la ecuación de lazo de falta.

A continuación, se pretende demostrar la ecuación básica del bucle de falta, llegando a esta expresión a través de algunos casos particulares de cortocircuito que pueden ocurrir en la línea de dos terminales objeto de estudio.

#### 5.1.1.- Falta monofásica c-g

El primer caso particular de cortocircuito que va a estudiarse para llegar a la ecuación básica de lazo de falta es el de una falta monofásica a tierra en la fase c a través de una resistencia de falta  $R_F$ . Un esquema de la situación de las fases en el punto en el que ocurre el cortocircuito puede verse en la Figura 14:



## 5.-Método de los relés diferenciales en línea de 2 terminales

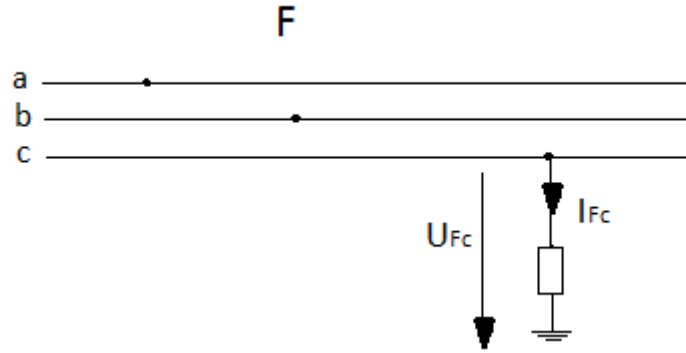


Figura 14: Esquema de la situación de las fases implicadas en un cortocircuito monofásico entre la fase c y tierra ocurrido en un punto intermedio F de la línea. Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta la relación entre las componentes de fase y las componentes simétricas de la tensión, la tensión de lazo de falta que aparece en el extremo A de la línea, correspondiente a una falta monofásica a tierra en la fase c, es la siguiente (ver Tabla 1 y Apartado 3.1):

$$\underline{U}_{Ac} = \underline{U}_{A0} + \underline{a}\underline{U}_{A1} + \underline{a}^2\underline{U}_{A2}$$

Donde  $\underline{a} = 1_{120^\circ}$ .

Considerando el circuito formado por el lazo de falta (Figura 13) para cada una de las redes de secuencia simétricas, donde para este tipo de falta la tensión de lazo de falta es igual a la de la fase c, se puede expresar esta tensión en el extremo de línea como:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{Ap} = \underline{U}_{Ac} &= d_F \underline{Z}_{0L} \underline{I}_{A0} + \underline{U}_{F0} + \underline{a}(d_F \underline{Z}_{1L} \underline{I}_{A1} + \underline{U}_{F1}) + \underline{a}^2(d_F \underline{Z}_{1L} \underline{I}_{A2} + \underline{U}_{F2}) = \\ &= d_F \underline{Z}_{1L} \left( \underline{a}\underline{I}_{A1} + \underline{a}^2\underline{I}_{A2} + \frac{\underline{Z}_{0L}}{\underline{Z}_{1L}} \underline{I}_{A0} \right) + \underline{U}_{F0} + \underline{a}\underline{U}_{F1} + \underline{a}^2\underline{U}_{F2}\end{aligned}$$

donde:

$\underline{U}_{F0}, \underline{U}_{F1}, \underline{U}_{F2}$  son las componentes simétricas de la tensión de falta entre el lugar de la línea en el que ocurre el cortocircuito y la referencia de tierra.

$\underline{Z}_{0L}$  es la impedancia de secuencia homopolar del tramo de la línea en el que ocurre la falta (tramo A-B), en ohm.

Por otra parte, la tensión de la fase c en el punto en el que ocurre la falta se relaciona con las componentes simétricas de la tensión y de la corriente de falta de la siguiente forma:

$$\underline{U}_{Fc} = \underline{U}_{F0} + \underline{a}\underline{U}_{F1} + \underline{a}^2\underline{U}_{F2} = R_F \underline{I}_{Fc} = R_F (\underline{I}_{F0} + \underline{a}\underline{I}_{F1} + \underline{a}^2\underline{I}_{F2})$$

Además, al tratarse de una falta monofásica en la fase c, las intensidades de falta en las otras dos fases son nulas:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{Fa} &= 0 \Rightarrow \underline{I}_{F0} + \underline{I}_{F1} + \underline{I}_{F2} = 0 \\ \underline{I}_{Fb} &= 0 \Rightarrow \underline{I}_{F0} + \underline{a}^2\underline{I}_{F1} + \underline{a}\underline{I}_{F2} = 0\end{aligned}$$

Restando las intensidades de falta de las fases  $a$  y  $b$  expresadas como composición de sus componentes simétricas y manipulando las ecuaciones anteriores se obtienen las siguientes relaciones entre las componentes simétricas de las intensidades de falta:

$$(1 - \underline{a}^2)I_{F1} + (1 - \underline{a})I_{F2} = 0 \quad \Rightarrow \quad I_{F2} = \underline{a}^2 I_{F1} \text{ ó } I_{F1} = \underline{a} I_{F2}$$

$$I_{F0} = -I_{F1} - I_{F2} = (-\underline{a} - 1)I_{F2} = \underline{a}^2 I_{F2}$$

La tensión de falta, por la ley de Ohm, es igual a la resistencia de falta multiplicada por la intensidad de falta. Descomponiendo la tensión de falta en sus componentes simétricas y teniendo en cuenta las relaciones anteriores se obtiene la siguiente relación:

$$\underline{U}_{F0} + \underline{a}\underline{U}_{F1} + \underline{a}^2\underline{U}_{F2} = R_F(\underline{a}^2 I_{F2} + \underline{a} * \underline{a} I_{F2} + \underline{a}^2 I_{F2}) = R_F 3\underline{a}^2 I_{F2}$$

Sustituyendo en la ecuación básica de lazo de falta, esta ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$\underline{U}_{Ac} = \underline{U}_{A0} + \underline{a}\underline{U}_{A1} + \underline{a}^2\underline{U}_{A2} = d_{FA}Z_{1LA}\left(\underline{a}I_{A1} + \underline{a}^2 I_{A2} + \frac{Z_{0LA}}{Z_{1LA}}I_{A0}\right) + R_F 3\underline{a}^2 I_{F2}$$

Observando la ecuación obtenida y sustituyendo el valor de  $\underline{a} = 1_{120^\circ} = -0.5 + j0.5\sqrt{3}$ , se puede ver que los coeficientes que multiplican a las magnitudes de lazo son los recogidos en la siguiente tabla:

$\underline{a}_0$	$\underline{a}_1$	$\underline{a}_2$	$\underline{a}_{F0}$	$\underline{a}_{F1}$	$\underline{a}_{F2}$
1	$-0.5 + j0.5\sqrt{3}$	$-0.5 - j0.5\sqrt{3}$	0	0	$-1.5 - j1.5\sqrt{3}$

Tabla 3: Valor que toman los coeficientes que multiplican a las magnitudes de lazo en la ecuación general de lazo, para el caso de una falta monofásica en la fase  $c$

### 5.1.2.- Falta bifásica $b$ - $c$

Al igual que se ha hecho para una falta monofásica, se va a desarrollar el caso de una falta bifásica para obtener los coeficientes que intervienen en la ecuación general del lazo de falta.

Se considera que la falta bifásica se da entre las fases  $b$  y  $c$  a través de una resistencia  $R_F$ . En la Figura 15 se representa un esquema de la situación de las fases implicadas en el punto de falta  $F$ :

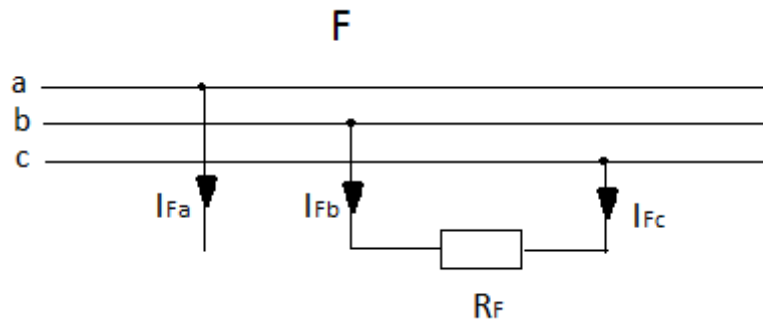


Figura 15: Esquema de la situación de las fases implicadas en un cortocircuito bifásico entre las fases  $b$  y  $c$  ocurrido en un punto intermedio  $F$  de la línea. Fuente: elaboración propia

La relación entre las tensiones en las fases  $b$  y  $c$  con las componentes simétricas de la tensión en el extremo A se puede ver en las siguientes ecuaciones (ver Apartado 3.1.):

$$\underline{U}_{Ab} = \underline{U}_{A0} + \underline{a}^2 \underline{U}_{A1} + \underline{a} \underline{U}_{A2}$$

$$\underline{U}_{Ac} = \underline{U}_{A0} + \underline{a} \underline{U}_{A1} + \underline{a}^2 \underline{U}_{A2}$$

Para cada red de secuencia se forma un lazo de falta tras la ocurrencia del cortocircuito. Teniendo en cuenta que cuando ocurre una falta bifásica la tensión homopolar  $\underline{U}_{A0}$  es nula, las tensiones de fase quedan de la siguiente manera:

$$\underline{U}_{Ab} = \underline{a}^2 (d_F \underline{Z}_{1L} \underline{I}_{A1} + \underline{U}_{F1}) + \underline{a} (d_F \underline{Z}_{1L} \underline{I}_{A2} + \underline{U}_{F2})$$

$$\underline{U}_{Ac} = \underline{a} (d_F \underline{Z}_{1L} \underline{I}_{A1} + \underline{U}_{F1}) + \underline{a}^2 (d_F \underline{Z}_{1L} \underline{I}_{A2} + \underline{U}_{F2})$$

Recordando que la tensión de lazo en el caso de una falta bifásica es la diferencia entre las tensiones de las fases implicadas en la falta (Tabla 1), dicha tensión de lazo quedaría como sigue:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{Ap} &= \underline{U}_{Ab} - \underline{U}_{Ac} = (\underline{a}^2 - \underline{a}) \underline{U}_{A1} + (\underline{a} - \underline{a}^2) \underline{U}_{A2} = \\ &= d_F \underline{Z}_{1L} [(\underline{a}^2 - \underline{a}) \underline{I}_{A1} + (\underline{a} - \underline{a}^2) \underline{I}_{A2}] + [(\underline{a}^2 - \underline{a}) \underline{U}_{F1} + (\underline{a} - \underline{a}^2) \underline{U}_{F2}] \end{aligned}$$

Sustituyendo el valor de  $\underline{a} = -0.5 + j\sqrt{3}/2$ , la tensión de lazo puede expresarse como:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{Ap} &= -j\sqrt{3} \underline{U}_{A1} + j\sqrt{3} \underline{U}_{A2} = d_F \underline{Z}_{1LA} (-j\sqrt{3} \underline{I}_{A1} + j\sqrt{3} \underline{I}_{A2}) + (-j\sqrt{3} \underline{U}_{F1} + j\sqrt{3} \underline{U}_{F2}) \\ &= d_F \underline{Z}_{1L} (-j\sqrt{3} \underline{I}_{A1} + j\sqrt{3} \underline{I}_{A2}) + \underline{U}_{Fb} - \underline{U}_{Fc} \end{aligned}$$

Por otra parte, la magnitud de fase de la intensidad de las fases en falta ( $\underline{I}_{Fb}$  ó  $\underline{I}_{Fc}$ ) circula entre dichas fases (ver Figura 15) y de aquí se deduce que la diferencia entre las tensiones de las fases  $b$  y  $c$  en el punto en el que ocurre el cortocircuito se puede expresar como:

$$\underline{U}_{Fb} - \underline{U}_{Fc} = R_F \underline{I}_{Fb}$$

Y por tratarse de una falta bifásica, se demuestra que la relación entre la intensidad de falta en la fase  $b$  y la componente simétrica de secuencia inversa es la siguiente:

$$\underline{I}_{Fb} = j\sqrt{3} \underline{I}_{F2}$$

Finalmente, se obtiene la expresión de la tensión de lazo de falta en el extremo A que recoge los coeficientes que multiplican a las componentes simétricas de la tensión y la intensidad en dicho extremo, es decir, la ecuación básica de lazo de falta.

Para el caso de una falta bifásica entre las fases  $b$  y  $c$ , la ecuación básica de lazo de falta es la siguiente:

$$\underline{U}_{AP} = \underline{U}_{Ab} - \underline{U}_{Ac} = -j\sqrt{3} \underline{U}_{A1} + j\sqrt{3} \underline{U}_{A2} = d_{FA} \underline{Z}_{1LA} (-j\sqrt{3} \underline{I}_{A1} + j\sqrt{3} \underline{I}_{A2}) + j\sqrt{3} R_F \underline{I}_{F2}$$

El valor de los coeficientes que multiplican a las magnitudes de falta en la ecuación anterior se resume en la siguiente tabla:

$\underline{a}_0$	$\underline{a}_1$	$\underline{a}_2$	$\underline{a}_{F0}$	$\underline{a}_1$	$\underline{a}_{F2}$
0	$-j\sqrt{3}$	$j\sqrt{3}$	0	0	$j\sqrt{3}$

Tabla 4: Valor que toman los coeficientes que multiplican a las magnitudes de lazo en la ecuación general de lazo, para el caso de una falta bifásica entre las fases b y c

## 5.2.- Resumen de valores de los coeficientes de ponderación de la ecuación básica de lazo de falta

El desarrollo efectuado para los dos casos de cortocircuito estudiados en este capítulo (falta monofásica a tierra en la fase c y falta bifásica entre las fases b y c), en los cuales interviene una resistencia de falta  $R_F$ , puede extenderse al resto de casos de cortocircuito que pueden ocurrir en una línea.

La Tabla 5 recoge el valor que toman los coeficientes de ponderación de la ecuación básica de lazo de falta que multiplican a las tensiones e intensidades de lazo de falta, para los diferentes tipos de cortocircuito:

Tipo de falta	$\underline{a}_1$	$\underline{a}_2$	$\underline{a}_0$
a-g	1	1	1
b-g	$-0.5-j0.5\sqrt{3}$	$0.5+j0.5\sqrt{3}$	1
c-g	$0.5+j0.5\sqrt{3}$	$-0.5-j0.5\sqrt{3}$	1
a-b, a-b-g a-b-c, a-b-c-g	$1.5+j0.5\sqrt{3}$	$1.5-j0.5\sqrt{3}$	0
b-c, b-c-g	$-j\sqrt{3}$	$j\sqrt{3}$	0
c-a, c-a-g	$-1.5+j0.5\sqrt{3}$	$-1.5-j0.5\sqrt{3}$	0

Tabla 5: Coeficientes de ponderación para la composición de la intensidad y tensión de lazo de falta del extremo de la línea que intervienen en la ecuación básica de lazo de falta

Y la Tabla 6 recoge los valores de los coeficientes de ponderación para la intensidad de falta en la ecuación básica de lazo de falta para los diferentes tipos de cortocircuito:

Tipo de falta	$\underline{a}_{F1}$	$\underline{a}_{F2}$	$\underline{a}_{F0}$
a-g	0	3	0
b-g	0	$1.5+j1.5\sqrt{3}$	0
c-g	0	$-1.5-j1.5\sqrt{3}$	0
a-b	0	$1.5-j0.5\sqrt{3}$	0
b-c	0	$j\sqrt{3}$	0
c-a	0	$-1.5-j0.5\sqrt{3}$	0
a-b-g	0	$3-j\sqrt{3}$	$j\sqrt{3}$
b-c-g	0	$j2\sqrt{3}$	$j\sqrt{3}$
c-a-g	0	$-3-j\sqrt{3}$	$j\sqrt{3}$
a-b-c a-b-c-g	$1.5+j0.5\sqrt{3}$	$1.5-j0.5\sqrt{3}$ *)	0

\*)  $\underline{a}_{F2} \neq 0$ , sin embargo, el componente de secuencia inversa no está presente bajo condiciones de faltas trifásicas equilibradas.

Tabla 6: Coeficientes de ponderación para la composición de la intensidad de lazo de falta en punto de la línea en el que ocurre el cortocircuito

### 5.3.- Aplicación al caso de una línea de dos terminales para diferentes casos de cortocircuito con $R_F$

Los errores obtenidos en el Apartado 4.4 al evaluar la distancia entre el extremo de la línea donde se sitúa el relé y el lugar de la línea en el que ocurre el cortocircuito tomaban un valor significativo cuando se consideraba la existencia de una resistencia de falta  $R_F$ .

En dicho apartado la distancia de falta se calculaba a partir de la impedancia del tramo en falta, calculada a su vez directamente a partir de las magnitudes de lazo, y no se tomaba en consideración la resistencia de falta  $R_F$ .

En el método de cálculo presentado en este capítulo de los relés diferenciales para una línea de dos terminales, donde se utiliza la ecuación básica de lazo de falta, los errores obtenidos al calcular la distancia de falta serán previsiblemente menores. Esto se debe a que en este caso sí que se toma en consideración la resistencia de falta  $R_F$  en la propia ecuación básica de lazo de falta.

Para verificar que el error obtenido al calcular la distancia de falta es menor cuando se utiliza el método de los relés diferenciales en una línea de dos terminales, se han calculado las distancias de falta a partir de la ecuación básica de lazo de falta, de donde resulta la siguiente expresión:

$$d_F = \frac{\text{real}(\underline{V}_{Ap})\text{imag}(\underline{I}_F) - \text{imag}(\underline{V}_{Ap})\text{real}(\underline{I}_F)}{\text{real}(\underline{Z}_{1L}\underline{I}_{Ap})\text{imag}(\underline{I}_F) - \text{imag}(\underline{Z}_{1L}\underline{I}_{Ap})\text{real}(\underline{I}_F)}$$

Una vez obtenida la distancia de falta, la resistencia de falta  $R_F$  también puede ser determinada, por ejemplo, a partir de la parte real de la ecuación básica de lazo de falta:

$$R_F = \frac{\text{real}(\underline{V}_{Ap}) - d_A \text{real}(\underline{Z}_{1L}\underline{I}_{Ap})}{\text{real}(\underline{I}_F)}$$

Las tensiones e intensidades de lazo de falta  $\underline{V}_{Ap}$ ,  $\underline{I}_{Ap}$  e  $\underline{I}_F$  se han obtenido utilizando los coeficientes de ponderación que intervienen en la ecuación básica de lazo de falta (Tablas 5 y 6 del Apartado 5.2) y las componentes simétricas de las tensiones e intensidades a las que multiplican dichos coeficientes.

Las magnitudes de fase de las tensiones e intensidades de falta se obtienen, al igual que en el apartado anterior, utilizando el método de cálculo desarrollado en el Apartado 3.3, simulando los diferentes tipos de cortocircuito en un punto situado a 50 km de la línea modelo del Apartado 3.2, pero sin considerar el tramo C-T, lo que equivale a considerar una línea de dos terminales.

De esta forma, los valores de la distancia de falta obtenidos para las diferentes situaciones de cortocircuito y con diferentes valores para  $R_F$ , se recogen en la siguiente tabla:

Tipo de falta	Distancia real	Calculada sin $R_F$	Calculada con $R_F = 5 \text{ ohm}$	Calculada con $R_F = 10 \text{ ohm}$
a-g	50	50.00	50.00	50.00
b-c	50	50.00	50.00	50.00
b-c-g	50	50.00	50.00	50.00
a-b-c-g	50	50.00	50.00	50.00

Tabla 7: Distancias en km al punto de falta calculadas aplicando la ecuación básica de lazo de falta y los coeficientes de ponderación de las magnitudes de lazo de falta para diferentes situaciones de cortocircuito

Observando los resultados obtenidos en la Tabla 7, se puede afirmar que los cálculos de la distancia de falta en una línea de dos terminales para diferentes situaciones de cortocircuito obtenidos a través de la ecuación básica de lazo de falta son exactos.

Comparando estos resultados con los recogidos en la Tabla 2 del Apartado 4.4, se puede concluir que para obtener un valor exacto de la distancia entre el extremo de la línea y el punto de la línea donde ocurre un cortocircuito, cuando existe una resistencia de falta  $R_F$ , no basta con calcular de forma directa la distancia de falta a partir de las magnitudes de lazo.

Por el contrario, se debe de tomar en consideración la resistencia de falta  $R_F$  aplicando la ecuación básica de lazo de falta, empleando diferentes coeficientes de ponderación para las tensiones e intensidades de lazo de falta según el tipo de cortocircuito estudiado, como se ha demostrado en este capítulo.

## 6.- MÉTODO DE LOS RELÉS DIFERENCIALES PARA UNA LÍNEA DE 3 TERMINALES. ALGORITMO LOCALIZADOR DE FALTAS

Los actuales relés de protección de corriente diferencial basados en microprocesadores son capaces de intercambiar señales digitales correspondientes a los fasores de corriente medidos localmente, incluso a través de grandes distancias. El principio de protección a través de relés de corriente diferencial requiere que haya sincronización entre las medidas digitales efectuadas en los diferentes terminales de una línea. Esto se consigue usando sistemas de comunicaciones como el sistema de posición global (GPS) u otras técnicas.

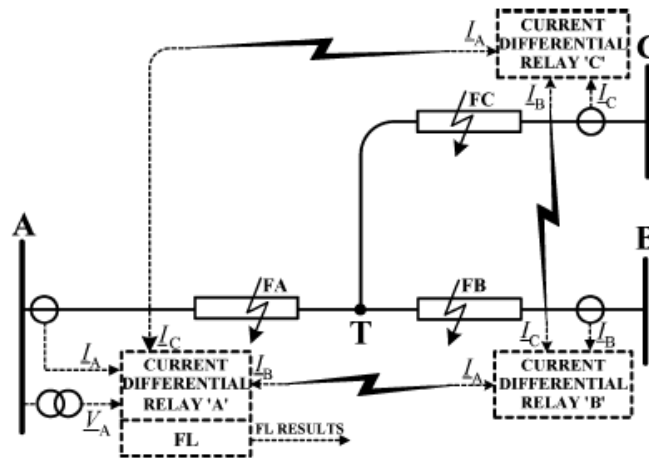


Figura 16: Localización de faltas en una línea de tres terminales asociada con relés de corriente diferencial. Fuente: artículo A Fault-Location Method for Application With Current Differential Relays of Three-Terminal Lines

Se considera para el presente caso que la función de localización de faltas es implementada en el relé de protección de corriente diferencial que se encuentra situado en una subestación localizada en el extremo A (Figura 16).

Para este propósito, los fasores de las corrientes trifásicas de los terminales de línea  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  (cuyos valores han sido proporcionados por los relés de corriente diferencial A, B y C), junto con el fasor de la tensión trifásica  $V_A$  medido localmente, son tomados como las señales de entrada del localizador de faltas. Estas medidas se consideran sincronizadas de aquí en adelante.

La técnica de localización de faltas propuesta está basada en el uso de tres subrutinas, que se denominarán  $SUB\_A$ ,  $SUB\_B$  y  $SUB\_C$ . El objetivo de estas subrutinas es el de localizar las faltas  $FA$ ,  $FB$  y  $FC$  en los hipotéticos lugares donde pueden producirse, dentro de los tramos de línea  $A-T$ ,  $B-T$  y  $C-T$ , respectivamente.

Es importante señalar que la posición en la que ocurre una falta es un factor aleatorio y que, por tanto, el tramo de línea en el que ocurre la falta no es conocido *a priori*. Por esta razón, la subrutina válida para la localización de la falta será seleccionada mediante un método de selección especial.

Para que el desarrollo de los Capítulos 6, 7 y 8 resulte más fluido, sobre todo en lo que respecta a la explicación del algoritmo, se va a utilizar una numeración de las ecuaciones presentadas en dichos capítulos, la cual no ha sido empleada en los capítulos anteriores.

### 6.1.- Algoritmo de localización de falta. Subrutina ***SUB\_A***

La subrutina *SUB\_A*, designada para la localización de faltas (*FA*) dentro del tramo de línea *A-T* (Figura 16), está basada en la siguiente ecuación generalizada de lazo de falta, cuyo desarrollo y origen fue explicado en el Capítulo 5:

$$\underline{V}_{Ap} - d_A \underline{Z}_{1LA} \underline{I}_{Ap} - R_{FA} \underline{I}_F = 0 \quad (1)$$

donde:

$d_A$  distancia desconocida a la falta en el tramo AT (en p.u.);

$R_{FA}$  resistencia de falta desconocida, en ohm;

$\underline{V}_{Ap}, \underline{I}_{Ap}$  tensión y corriente del bucle de falta, en V y A, respectivamente;

$\underline{Z}_{1LA}$  impedancia de secuencia directa del tramo AT, en ohm;

$\underline{I}_F$  corriente de falta total, en A.

La composición de la tensión y la corriente de lazo de falta dependen del tipo de cortocircuito, mediante las siguientes sumas ponderadas de las respectivas componentes simétricas de las señales medidas, que forman las magnitudes de lazo de falta (ver Capítulo 5):

$$\underline{V}_{Ap} = \underline{a}_1 \underline{V}_{A1} + \underline{a}_2 \underline{V}_{A2} + \underline{a}_0 \underline{V}_{A0} \quad (2)$$

$$\underline{I}_{Ap} = \underline{a}_1 \underline{I}_{A1} + \underline{a}_2 \underline{I}_{A2} + \underline{a}_0 \frac{\underline{Z}_{0LA}}{\underline{Z}_{1LA}} \underline{I}_{A0} \quad (3)$$

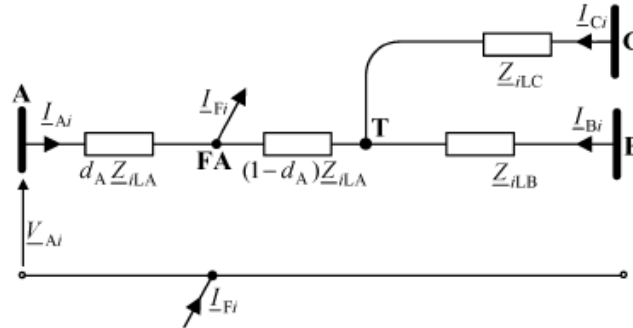


Figura 17: Diagrama de circuito de la línea de tres terminales bajo falta en el tramo AT, para la componente simétrica *i*-ésima. Fuente: artículo *A Fault-Location Method for Application With Current Differential Relays of Three-Terminal Lines*

donde:

$\underline{a}_1, \underline{a}_2, \underline{a}_0$  coeficientes de ponderación de las magnitudes de lazo;

$\underline{V}_{A1}, \underline{V}_{A2}, \underline{V}_{A0}$  componentes simétricas de las tensiones medidas en el extremo A;

$\underline{I}_{A1}, \underline{I}_{A2}, \underline{I}_{A0}$  componentes simétricas de las corrientes medidas en el extremo A;

$\underline{Z}_{0LA}$  impedancia de secuencia homopolar del tramo de línea A-T.



Las señales del lazo de falta (2) y (3), así como las usadas en las restantes subrutinas, son expresadas en términos de sus respectivas componentes simétricas, cuya obtención a partir de las magnitudes de fase ya fue explicada en el Apartado 3.1.

Se pretende calcular la corriente de falta total a partir de la ecuación general de lazo de falta (1) usando la siguiente expresión en la que se utilizan los coeficientes de ponderación para la intensidad de falta:

$$I_F = \underline{a}_{F1}I_{F1} + \underline{a}_{F2}I_{F2} + \underline{a}_{F0}I_{F0} \quad (4)$$

donde

$\underline{a}_{F1}, \underline{a}_{F2}, \underline{a}_{F0}$  coeficientes de ponderación para la intensidad de falta (Tabla 6).

Atendiendo al esquema representado en la Figura 17, puede verse que la  $i$ -ésima componente de secuencia de la corriente de falta total se determina como la suma de las  $i$ -ésimas componentes de secuencia de las corrientes de los terminales de línea (A, B y C).

$$I_{Fi} = I_{Ai} + I_{Bi} + I_{Ci} \quad (5)$$

Los coeficientes de participación de (4) pueden ser determinados realizando un análisis de las condiciones límite para tipos de falta particulares, como se realizó en el Apartado 5.1 para los casos de falta monofásica  $c-g$  y falta bifásica  $b-c$ . De esta forma se obtienen diferentes conjuntos de estos coeficientes, en función del tipo de cortocircuito ocurrido.

Como puede comprobarse, en los coeficientes de participación de la Tabla 6 se excluyen las componentes de secuencia directa ( $\underline{a}_{F1} = 0$ ) de la corriente de falta total (4) para todos los tipos de faltas, excepto para las faltas trifásicas equilibradas. Para el caso de estas faltas, sólo las componentes de secuencia directa están contenidas en las señales.

Después de resolver (1) en sus partes real e imaginaria, y eliminando la resistencia de falta no conocida ( $R_{FA}$ ), la distancia buscada al punto donde ocurre la falta ( $d_A$ ) puede expresarse de la siguiente manera, llegando a una expresión similar a la obtenida en el Apartado 5.3:

$$d_A = \frac{\text{real}(\underline{V}_{Ap})\text{imag}(\underline{I}_F) - \text{imag}(\underline{V}_{Ap})\text{real}(\underline{I}_F)}{\text{real}(\underline{Z}_{1LA}\underline{L}_{Ap})\text{imag}(\underline{I}_F) - \text{imag}(\underline{Z}_{1LA}\underline{L}_{Ap})\text{real}(\underline{I}_F)} \quad (6)$$

Una vez obtenida la distancia de falta (6), la resistencia de falta  $R_{FA}$  también puede ser determinada, por ejemplo, a partir de la parte real de (1):

$$R_{FA} = \frac{\text{real}(\underline{V}_{Ap}) - d_A \text{real}(\underline{Z}_{1LA}\underline{L}_{Ap})}{\text{real}(\underline{I}_F)} \quad (7)$$

## 6.2.- Algoritmo de localización de faltas. Subrutinas SUB\_B y SUB\_C

### 6.2.1.-Modelo de línea de parámetros distribuidos

En la subrutina SUB\_A el modelo de línea que se había considerado era el de una línea corta, es decir, aquel en el que se desprecia la capacidad de la línea. Para líneas cuya longitud es inferior a 80 km, los resultados obtenidos con el modelo de línea corta pueden considerarse aceptables. Sin embargo, para longitudes superiores, como la del tramo A (100 km), es necesario utilizar un modelo que tenga en cuenta el efecto de la capacidad de la línea: el modelo de línea larga o de parámetros distribuidos.

El modelo de línea de parámetros distribuidos considera la longitud incremental de la línea y tiene en cuenta el efecto exacto de la capacidad distribuida y su relación con la impedancia de la línea.

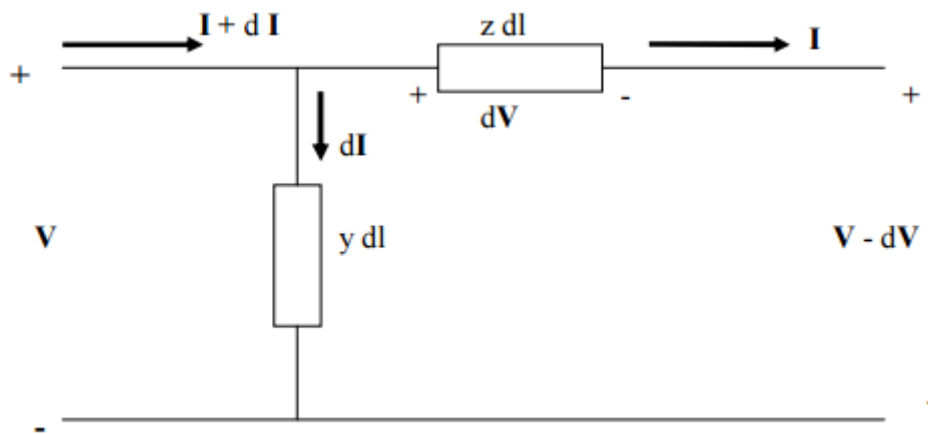


Figura 18 Esquema diferencial de una línea de transmisión a partir del que se obtiene el modelo de línea de parámetros distribuidos. Fuente: U.T.O. F.N.I. - LINEAS DE TRANSMISIÓN, Gustavo Adolfo Bustillo

La Figura 18 representa un esquema diferencial de la línea a partir del cual se desarrollan las ecuaciones que constituyen el modelo de línea de parámetros distribuidos, donde:

$\underline{z} = r + j xL$  = Impedancia en serie por unidad de longitud ( $\Omega/\text{km}$ )

$\underline{y}$  = Admitancia en paralelo por unidad de longitud ( $\text{S}/\text{km}$ )

$dl$  = Longitud del tramo diferencial de línea

$\underline{z} dl$  = Impedancia en serie del tramo de línea de longitud  $dl$  ( $\Omega$ )

$\underline{y} dl$  = Admitancia en paralelo del tramo de línea de longitud  $dl$  ( $\text{S}$ )

A partir del esquema de la Figura 18 pueden obtenerse de forma analítica (ver desarrollo completo en Anexo I), las siguientes expresiones que permiten obtener la tensión y la corriente en un punto cualquiera de la línea a una distancia  $l$  del extremo receptor:

$$\underline{V} = \cosh\left(\sqrt{\underline{zy}} * l\right) * \underline{V}_R - \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} \sinh\left(\sqrt{\underline{zy}} * l\right) * \underline{I}_R \quad (8)$$

$$\underline{I} = \underline{V}_R \sqrt{\frac{\underline{y}}{\underline{z}}} * \sinh\left(\sqrt{\underline{zy}} * l\right) + \underline{I}_R \cosh\left(\sqrt{\underline{zy}} * l\right)$$

donde:

$\underline{V}_R$  es la tensión en el extremo receptor del tramo de línea considerado

$\underline{I}_R$  es la corriente en el extremo receptor del tramo de línea considerado

De esta manera, se pueden transferir analíticamente las magnitudes trifásicas  $\underline{V}_A, \underline{I}_A$  del extremo A de la línea hasta el extremo T con un cierto grado de precisión.

Evidentemente, dicha transferencia debe ser realizada de forma separada para las diferentes componentes simétricas (representadas por el subíndice  $i$ ) de las corrientes y tensiones trifásicas.

### 6.2.2.-Subrutina SUB\_B

En este caso, los valores medidos de las magnitudes trifásicas  $\underline{V}_A, \underline{I}_A$ , e  $\underline{I}_C$  son transferidos analíticamente al principio del tramo B-T, considerando de manera rigurosa el modelo de línea de parámetros distribuidos. El superíndice "transf" se usa para distinguir las señales transferidas analíticamente de las señales medidas.

La Figura 19 representa un diagrama del circuito equivalente de la línea para la  $i$ -ésima componente simétrica ( $i = 1$  para las componentes de secuencia directa,  $i = 2$  para la secuencia inversa e  $i = 0$  para la secuencia homopolar) cuando ocurre un cortocircuito en el tramo B-T.

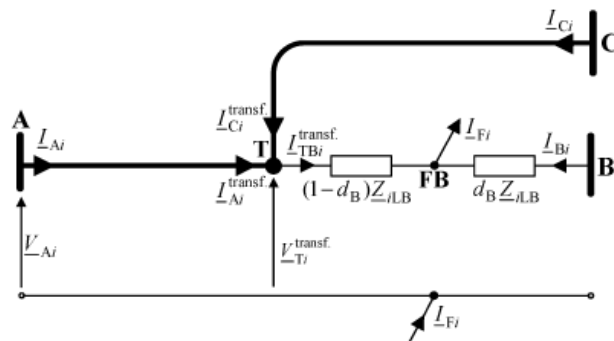


Figura 19: Diagrama de circuito de la línea de tres terminales bajo falta en el tramo T-B, para la componente simétrica  $i$ -ésima. Fuente: artículo A Fault-Location Method for Application With Current Differential Relays of Three-Terminal Lines

Considerando el mencionado modelo de línea de parámetros distribuidos para una línea de transmisión de larga longitud, la transferencia de la tensión desde el extremo A hasta el punto T da lugar a:

$$\underline{V}_{Ti}^{transf.} = \cosh(\gamma_{iLA} * l_{LA}) * \underline{V}_{Ai} - \underline{Z}_{ciLA} * \sinh(\gamma_{iLA} * l_{LA}) * \underline{I}_{Ai} \quad (9)$$

donde

$$\underline{Z}_{ciLA} = \sqrt{\underline{Z}'_{iLA} / \underline{Y}'_{iLA}}$$

impedancia característica del tramo de línea A-T para la secuencia  $i$ -ésima;

$$\gamma_{iLA} = \sqrt{\underline{Z}'_{iLA} \underline{Y}'_{iLA}}$$

constante de propagación del tramo de línea A-T para la secuencia  $i$ -ésima;

$\underline{Z}'_{iLA}$	impedancia por unidad de longitud del tramo de línea $A-T$ para la secuencia $i$ -ésima ( $\Omega/\text{km}$ );
$\underline{Y}'_{iLA}$	admitancia por unidad de longitud del tramo de línea $A-T$ para la secuencia $i$ -ésima ( $\text{S}/\text{km}$ );
$l_{LA}$	longitud total del tramo $A-T$ (km).

La transferencia de la  $i$ -ésima componente simétrica de secuencia de la corriente desde el inicio del tramo de línea  $A-T$  (barra A) hasta el final de este tramo (punto T) da lugar a:

$$\underline{I}_{Ai}^{transf.} = \frac{-\sinh(\underline{\gamma}_{iLA} l_{LA}) * \underline{V}_{Ai}}{\underline{Z}_{ciLA}} + \cos(\underline{\gamma}_{iLA} l_{LA}) * \underline{I}_{Ai} \quad (10)$$

La transferencia de la corriente para el tramo de línea  $C-T$ , realizada de manera análoga que en (10), da lugar a  $\underline{I}_{Ci}^{transf.}$  (Figura 19).

La  $i$ -ésima componente simétrica de secuencia de la corriente del tramo de línea  $B-T$ , en el que se produce la falta (Figura 19), circula desde el punto T hacia el punto de falta  $FB$  ( $\underline{I}_{TBi}^{transf.}$ ) y se calcula como la suma de las corrientes transferidas desde los terminales A y C:

$$\underline{I}_{TBi}^{transf.} = \underline{I}_{Ai}^{transf.} + \underline{I}_{Ci}^{transf.} \quad (11)$$

Por tanto, utilizando las señales transferidas determinadas en las ecuaciones (9) y (11), se obtienen la tensión de bucle de falta  $\underline{V}_{Tp}$  y la corriente  $\underline{I}_{TBp}$ , de forma análoga a como se hizo en las expresiones (2) y (3). Para determinar la distancia a la falta en el tramo de línea  $B-T$ , se usa la siguiente ecuación de lazo de falta:

$$\underline{V}_{Tp} - (1 - d_B) \underline{Z}_{1LB} \underline{I}_{TBp} - R_{FB} \underline{I}_F = 0 \quad (12)$$

donde

$d_B$	distancia a la falta desconocida en el tramo $B-T$ (p.u.) desde el extremo B hacia el punto de falta $FB$ ;
$R_{FB}$	resistencia de falta desconocida;
$\underline{V}_{Tp}, \underline{I}_{TBp}$	tensión y corriente del bucle de falta para la subrutina $SUB\_B$ ;
$\underline{Z}_{1LB}$	impedancia de secuencia directa del tramo $B-T$ ;
$\underline{I}_F$	corriente de falta total (ecuaciones: (4), (5), Tabla 6).

Después de resolver (12) en sus partes real e imaginaria y eliminando la resistencia de falta desconocida ( $R_{FB}$ ), la distancia a la falta buscada ( $d_B$ ) se determina usando la siguiente expresión:

$$d_A = \frac{\text{imag}(\underline{V}_{Tp} - \underline{Z}_{1LB} \underline{I}_{TBp}) \text{real}(\underline{I}_F) - \text{real}(\underline{V}_{Tp} - \underline{Z}_{1LB} \underline{I}_{TBp}) \text{imag}(\underline{I}_F)}{\text{real}(\underline{Z}_{1LB} \underline{I}_{TBp}) \text{imag}(\underline{I}_F) - \text{imag}(\underline{Z}_{1LB} \underline{I}_{TBp}) \text{real}(\underline{I}_F)} \quad (13)$$

De forma similar al caso de la subrutina *SUB\_A* (7), la resistencia de falta  $R_{FB}$  se puede calcular como:

$$R_{FB} = \frac{\text{real}(\underline{V}_{Tp}) - (1-d_B)\text{real}(\underline{Z}_{1LB}\underline{I}_{TBp})}{\text{real}(\underline{I}_F)} \quad (14)$$

### 6.2.3.-Subrutina *SUB\_C*

La subrutina *SUB\_C*, designada para la localización de faltas en el tramo de línea C-T, se desarrolla de forma similar a la subrutina *SUB\_B* (Subapartado 6.2.2) y, por ello, no se presenta.

## 6.3.- Selección de la subrutina válida

El algoritmo de localización de faltas presentado está formado por tres subrutinas y sólo una de ellas (la subrutina válida) proporciona los resultados que corresponden a la falta real. Las otras dos subrutinas devuelven resultados que se consideran falsos.

Un proceso de selección multicriterio ha sido desarrollado para seleccionar la subrutina válida o, dicho de otra forma, para determinar el tramo de línea en el que ocurre la falta.

En la primera etapa del proceso de selección, se utilizan los resultados obtenidos a partir de los cálculos realizados por cada subrutina para determinar la distancia y la resistencia de falta, es decir, cada vez que se ejecuta el algoritmo, se ejecutan a su vez las tres subrutinas del programa.

La subrutina que al evaluar la distancia a la falta indica que la falta considerada ha ocurrido fuera del tramo de línea (distancia fuera del rango 0 a 1 p.u.) y/o que la resistencia de falta calculada tiene un valor negativo, será, efectivamente, rechazada. Si se rechazan dos de las subrutinas por no cumplir las condiciones mencionadas, el algoritmo devolverá como salidas la distancia y la resistencia de falta calculada por la subrutina no rechazada.

La segunda etapa para la selección de la subrutina válida se usa cuando la primera etapa no es suficiente, es decir, cuando dos de las subrutinas pasan el primer filtro de selección. En esta etapa, las impedancias de fuente remotas (detrás de los terminales B y C, si se considera que el localizador de faltas está instalado en el extremo A de la Figura 16), se calculan para diferentes subrutinas.

Por ejemplo, en el caso de considerar la subrutina *SUB\_B* (Figura 19, Subapartado 6.2.2.) para localizar faltas en el tramo de línea T-B, la impedancia de falta detrás de la barra B para la secuencia directa (o inversa) se calcula como:

$$\underline{Z}_{1SB}^{SUB\_B} = \underline{Z}_{2SB}^{SUB\_B} = \frac{-\underline{V}_{B2}^{SUB\_B}}{\underline{I}_{B2}} \quad (15)$$

donde la tensión estimada en la barra B es igual a:

$$\underline{V}_{B2}^{SUB\_B} = \underline{V}_{T2}^{transf.} - (1-d_B)\underline{Z}_{1LB}\underline{I}_{TB2}^{transf.} + d_B\underline{Z}_{1LB}\underline{I}_{B2} \quad (16)$$

Como puede verse, en los cálculos realizados en (15) y (16) se usan las componentes de secuencia inversa. Esto se debe a que, si se utilizasen las componentes de

secuencia directa, el efecto de la capacidad de la línea podría ser significativo, lo que llevaría a introducir un error en los cálculos de (15) y (16).

La impedancia de la fuente detrás de la barra C se calcula de forma análoga a (15) y (16) y, en efecto, las impedancias de fuente se calculan de acuerdo con la subrutina *SUB\_C*.

Habiendo calculado las impedancias de las fuentes detrás de las barras remotas B y C, mediante el uso de ambas subrutinas (*SUB\_B*, *SUB\_C*), se debe comprobar en qué cuadrante del plano complejo se sitúan.

La impedancia de fuente equivalente real presenta la forma de una rama inductiva *R-L* (es decir, se considera que está situada en el 1er cuadrante del plano complejo de impedancias). Si la impedancia de fuente, calculada según la subrutina considerada, se sitúa fuera del primer cuadrante, entonces esta subrutina se considera falsa y debe ser rechazada. De lo contrario, si aún hay al menos dos subrutinas (de tres) remanentes, la selección tiene que continuar.

Una subrutina puede ser rechazada también si el valor calculado de la impedancia remota difiere de la impedancia real, lo que constituiría la tercera y última etapa del procedimiento de selección de la subrutina válida. Para este propósito, se debe de poseer un conocimiento certero del valor real de las fuentes equivalentes detrás de los terminales de línea.

## 7.- EVALUACIÓN DEL ALGORITMO DE LOCALIZACIÓN DE FALTAS

### 7.1.- Consideraciones previas

Para probar el funcionamiento correcto del algoritmo presentado en el Capítulo 6, se utilizan como entradas del mismo los valores de fase de la corriente y la tensión medidas en el extremo en el que se sitúa el localizador de faltas y los valores de fase de las corrientes de los otros dos extremos de la línea.

Estas magnitudes se obtienen, a su vez, simulando varios casos de cortocircuito en puntos intermedios de los tres tramos que forman la línea. Esta simulación se realiza empleando el método de cálculo de tensiones e intensidades de cortocircuito explicado en el Capítulo 3 para la línea modelo de tres terminales, cuyos parámetros ya fueron presentados en el Apartado 3.2.

La simulación realizada según el criterio anterior supone una simplificación de la realidad, puesto que en la obtención de los fasores de corrientes y tensiones se utiliza un modelo de línea de parámetros no distribuidos, el cual sólo se puede aplicar con una precisión aceptable a líneas de distancias inferiores a 80 km.

Otra simplificación introducida es la suposición de que los transformadores de tensión e intensidad que miden las tensiones e intensidades que se utilizan como entradas del algoritmo, se consideran ideales. Esto supone que no se introduce ningún error en la medida de las corrientes y tensiones, cuando en la realidad siempre existe un error asociado a las medidas efectuadas por los transformadores de tensión e intensidad.

Sin embargo, es aceptable considerar las simplificaciones señaladas a efectos de la comprobación del funcionamiento básico del algoritmo.

Si el algoritmo funciona correctamente, tras introducir en él como entradas las intensidades de falta de cada uno de los terminales y la tensión de falta de uno de ellos, debe devolver como salidas la resistencia de falta y la distancia al punto de la línea en el que ocurrió la falta, medidas desde uno de los extremos de la línea, calculadas con un cierto grado de precisión.

El extremo de línea desde el que se calcula la distancia de falta debe corresponder con el del tramo de línea en el que ocurre realmente la falta, para lo cual el procedimiento de selección de la subrutina válida debe funcionar adecuadamente.

De esta manera, se comprobará la validez de las ecuaciones básicas de lazo de falta que forman parte de cada subrutina del algoritmo y el funcionamiento correcto del procedimiento de selección de dichas subrutinas.

### 7.2.-Resultados

Para presentar y discutir los resultados obtenidos con el algoritmo localizador de faltas se han considerado diferentes tipos de cortocircuito. Sin embargo, sólo se presentan, como caso representativo del funcionamiento del algoritmo, los resultados obtenidos para una falta bifásica a tierra aplicada a través de una resistencia de falta de 10 ohmios, entre las fases *b* y *c* (falta tipo *b-c-g*), en diferentes localizaciones (distancias desde los extremos de los tramos de línea de 0.1 a 0.9 p.u.) de los diferentes tramos de línea. El algoritmo de localización de faltas desarrollado conduce a resultados parecidos para los

otros tipos de cortocircuito, siendo los errores de precisión en la localización de la falta similares a los del caso presentado.

En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos tras simular una falta *b-c-g* en el tramo de línea *A-T*:

$d_A$ real (p.u.)	SUB_A		SUB_B		SUB_C	
	$d_A$ (p.u.)	$R_{FA}$ (ohm)	$d_B$ (p.u.)	$R_{FB}$ (ohm)	$d_C$ (p.u.)	$R_{FC}$ (ohm)
0.1	<b>0.1</b>	<b>10</b>	2.0452	10.4176	2.8857	11.1168
0.2	<b>0.2</b>	<b>10</b>	1.8894	10.4211	2.631	11.459
0.3	<b>0.3</b>	<b>10</b>	1.7422	10.4325	2.3822	11.6152
0.4	<b>0.4</b>	<b>10</b>	1.604	10.4378	2.1412	11.6125
0.5	<b>0.5</b>	<b>10</b>	1.4753	10.4255	1.9104	11.4796
0.6	<b>0.6</b>	<b>10</b>	1.3566	10.3873	1.6923	11.2467
0.7	<b>0.7</b>	<b>10</b>	1.2489	10.3182	1.4895	10.9449
0.8	<b>0.8</b>	<b>10</b>	1.1531	10.2173	1.3051	10.6063
0.9	<b>0.9</b>	<b>10</b>	1.0704	10.0886	1.1422	10.263

Tabla 8: Resultados del algoritmo localizador de faltas: falta *b-c-g* en tramo de línea *A-T*,  $R_{FA} = 10$  ohm

Como puede observarse en la Tabla 8, para una falta *b-c-g* en el tramo de línea *A-T*, la única subrutina que conduce a resultados correctos (con un cálculo exacto del lugar de la línea en el que ocurre la falta) es la subrutina *SUB\_A*. Las otras dos subrutinas son rechazadas siguiendo la primera etapa del procedimiento de selección de la subrutina válida, al estar las distancias calculadas por estas subrutinas fuera del rango admisible ( $d_B$  y  $d_C > 1$  p.u.).

La no existencia de errores en el cálculo de la distancia y la resistencia de falta al emplear como datos de entrada del algoritmo los provenientes de simular un cortocircuito en el tramo *A-T*, se debe a las condiciones en las que se realiza la propia simulación. En esta simulación se ha seguido un procedimiento de cálculo de cortocircuitos que considera un modelo de línea corta o de parámetros no distribuidos (ver Apartado 3.3) y las ecuaciones de la subrutina *SUB\_A* para el cálculo de la distancia de falta también se basan en este modelo de línea. Por lo tanto, lo que se está realizando en la simulación es obtener las corrientes y tensiones de falta a partir de una distancia y una resistencia de falta predeterminadas, mientras que en la subrutina *SUB\_A* se procede de manera inversa: a partir de unas tensiones e intensidades de falta se calculan la distancia y la resistencia de falta correspondientes.

La deducción anterior permite afirmar que las ecuaciones empleadas en la subrutina *SUB\_A* (y, por extensión, en las otras subrutinas) son válidas para evaluar la distancia a la que ocurre un cortocircuito en uno de los tramos de una línea de tres terminales, así como también lo es el desarrollo efectuado en los Capítulos 4 y 5 para obtener las expresiones matemáticas usadas en el algoritmo.

Una vez comprobado el funcionamiento correcto de la subrutina *SUB\_A*, se presentan los resultados correspondientes a la simulación de faltas *b-c-g* en los tramos de línea *B-T* (Tabla 9) y *C-T* (Tabla 10).



## 7.-Evaluación del algoritmo de localización de faltas

$d_B$ real (p.u.)	SUB_A		SUB_B		SUB_C	
	$d_A$ (p.u.)	$R_{FA}$ (ohm)	$d_B$ (p.u.)	$R_{FB}$ (ohm)	$d_C$ (p.u.)	$R_{FC}$ (ohm)
<b>0.1</b>	2.304	11.627	<b>0.1211</b>	<b>9.8109</b>	0.5388	8.3453
<b>0.2</b>	2.2029	11.6904	<b>0.218</b>	<b>9.8251</b>	0.4955	8.3066
<b>0.3</b>	2.0802	11.6527	<b>0.3151</b>	<b>9.8394</b>	0.4691	8.3552
<b>0.4</b>	1.9431	11.5287	<b>0.4125</b>	<b>9.854</b>	0.462	8.4775
<b>0.5</b>	1.7967	11.3358	<b>0.5101</b>	<b>9.8687</b>	0.4769	8.6596
<b>0.6</b>	1.6438	11.0928	<b>0.608</b>	<b>9.8835</b>	0.5169	8.8868
<b>0.7</b>	1.4866	10.8188	<b>0.7061</b>	<b>9.8983</b>	0.5853	9.1444
<b>0.8</b>	1.3264	10.5328	<b>0.8045</b>	<b>9.913</b>	0.6863	9.4171
<b>0.9</b>	1.164	10.2537	<b>0.9032</b>	<b>9.9277</b>	0.8242	9.6898

Tabla 9: Resultados del algoritmo localizador de faltas: falta b-c-g en tramo de línea B-T,  $R_{FB} = 10$  ohm

$d_C$ real (p.u.)	SUB_A		SUB_B		SUB_C	
	$d_A$ (p.u.)	$R_{FA}$ (ohm)	$d_B$ (p.u.)	$R_{FB}$ (ohm)	$d_C$ (p.u.)	$R_{FC}$ (ohm)
<b>0.1</b>	1.5716	11.4454	0.8352	10.3869	<b>0.1219</b>	<b>9.847</b>
<b>0.2</b>	1.5312	11.4131	0.8317	10.388	<b>0.2192</b>	<b>9.8582</b>
<b>0.3</b>	1.424	11.3351	0.833	10.3783	<b>0.3167</b>	<b>9.8694</b>
<b>0.4</b>	1.4268	11.2161	0.8391	10.3562	<b>0.4144</b>	<b>9.8807</b>
<b>0.5</b>	1.3655	11.062	0.8506	10.3206	<b>0.5122</b>	<b>9.8919</b>
<b>0.6</b>	1.2994	10.879	0.8678	10.2708	<b>0.6103</b>	<b>9.9032</b>
<b>0.7</b>	1.2293	10.6739	0.891	10.2068	<b>0.7085</b>	<b>9.9143</b>
<b>0.8</b>	1.1558	10.454	0.9208	10.1296	<b>0.807</b>	<b>9.9254</b>
<b>0.9</b>	1.0792	10.2268	0.9577	10.0405	<b>0.9056</b>	<b>9.9364</b>

Tabla 10: Resultados del algoritmo localizador de faltas: falta b-c-g en tramo de línea C-T,  $R_{FC} = 10$  ohm

Para los casos en los que la falta *b-c-g* ocurre en los tramos de línea *B-T* y *C-T*, la subrutina *SUB\_A* es rechazada en la primera etapa de selección de la subrutina válida ( $d_A > 1$  p.u.). Las otras dos subrutinas dan resultados que podrían ser aceptados en el procedimiento de selección de la subrutina válida:  $0 < d_B$  y  $d_C < 1$  p.u., y resistencias de falta positivas ( $R_{FB}$  y  $R_{FC} > 0$  p.u.).

Para seleccionar cuál de las dos subrutinas remanentes (*SUB\_B* y *SUB\_C*) es la válida, deben ejecutarse las etapas posteriores del procedimiento de selección de la subrutina válida.

En la Tabla 11 se muestra la localización en el plano complejo de las impedancias de fuente detrás de los extremos B y C (subíndices de las impedancias) calculadas mediante las subrutinas *SUB\_B* y *SUB\_C* (superíndices de las impedancias) cuando las faltas ocurren el tramo de línea *B-T*.

d_B real (p.u.)	Cuadrante del plano complejo en el que se encuentran las impedancias de fuente calculadas				SELECC.
	$Z_{1SB}^{SUB\_B}$	$Z_{1SC}^{SUB\_B}$	$Z_{1SB}^{SUB\_C}$	$Z_{1SC}^{SUB\_C}$	
0.1	1º	1º	3º	1º	SUB_B
0.2	1º	1º	3º	1º	SUB_B
0.3	1º	1º	3º	1º	SUB_B
0.4	1º	1º	3º	1º	SUB_B
0.5	1º	1º	3º	1º	SUB_B
0.6	1º	1º	3º	1º	SUB_B
0.7	1º	1º	3º	1º	SUB_B
0.8	1º	1º	4º	1º	SUB_B
0.9	1º	1º	1º	1º	SUB_B*

Tabla 11: Selección de la subrutina válida: falta b-c-g en tramo de línea B-T,  $R_{FB} = 10 \text{ ohm}$  (Resultados en Tabla 9)

Para todos los casos de falta excepto para  $d = 0.9 \text{ p.u.}$ , las impedancias de fuente calculadas mediante la subrutina  $SUB\_B$ ,  $Z_{1SB}^{SUB\_B}$  y  $Z_{1SC}^{SUB\_B}$ , permanecen en el primer cuadrante del plano complejo. Sin embargo, esto no se cumple para las impedancias de fuente calculadas mediante la subrutina  $SUB\_C$ : la impedancia  $Z_{1SB}^{SUB\_C}$  cae en el tercer y cuarto cuadrante del plano complejo. Como resultado de la segunda etapa del procedimiento de selección de la subrutina, la subrutina  $SUB\_B$  es seleccionada como válida.

En el caso en el que  $d = 0.9 \text{ p.u.}$ , la segunda etapa del proceso de selección de la subrutina es insuficiente, puesto que tanto las impedancias de fuente calculadas mediante la subrutina  $SUB\_B$  como las calculadas por la subrutina  $SUB\_C$ , se emplazan en el primer cuadrante. Por ello, debe actuar una última etapa del procedimiento de selección: en esta etapa se comparan las impedancias de fuente calculadas con las impedancias reales (utilizadas en el modelo de línea):

$$\frac{|Z_{1SB}^{SUB\_B}|}{|Z_{1SB\_real}|} = 0.959; \quad \frac{|Z_{1SC}^{SUB\_B}|}{|Z_{1SC\_real}|} = 0.994 \quad \Rightarrow \quad SUB\_B \text{ seleccionada,}$$

$$\frac{|Z_{1SB}^{SUB\_C}|}{|Z_{1SB\_real}|} = 0.116; \quad \frac{|Z_{1SC}^{SUB\_C}|}{|Z_{1SC\_real}|} = 1.684 \quad \Rightarrow \quad SUB\_C \text{ rechazada.}$$

Esta comparación muestra que las magnitudes de las impedancias calculadas mediante la subrutina  $SUB\_C$  tienen valores de 0.116 y 1.684 veces el valor de la magnitud de las impedancias reales. Como estos multiplicadores difieren en gran medida de la unidad, la subrutina  $SUB\_C$  es rechazada, mientras que la subrutina  $SUB\_B$  permanece como la subrutina válida.

En la Tabla 12 se presentan los emplazamientos de las impedancias de fuente calculadas a través de las subrutinas  $SUB\_B$  y  $SUB\_C$  para los casos de falta ocurridos en el tramo de línea C-T.

d_C real (p.u.)	Cuadrante del plano complejo en el que se encuentran las impedancias de fuente calculadas				SELECC.
	$Z_{1SB}^{SUB\_B}$	$Z_{1SC}^{SUB\_B}$	$Z_{1SB}^{SUB\_C}$	$Z_{1SC}^{SUB\_C}$	
0.1	1º	3º	1º	1º	SUB_C
0.2	1º	3º	1º	1º	SUB_C
0.3	1º	4º	1º	1º	SUB_C
0.4	1º	4º	1º	1º	SUB_C
0.5	1º	4º	1º	1º	SUB_C
0.6	1º	4º	1º	1º	SUB_C
0.7	1º	1º	1º	1º	SUB_C*
0.8	1º	1º	1º	1º	SUB_C*
0.9	1º	1º	1º	1º	SUB_C*

Tabla 12: Selección de la subrutina válida: falta b-c-g en tramo de línea C-T,  $R_{FB} = 10 \text{ ohm}$  (Resultados en Tabla 10)

Siguiendo un razonamiento similar al seguido antes para los casos de falta en el tramo B-T, se selecciona la subrutina *SUB\_C* como subrutina válida en la segunda etapa del procedimiento de selección para los casos de falta de  $d = 0.1$  p.u. a  $d = 0.6$  p.u. Para  $d = 0.7$  p.u.,  $d = 0.8$  p.u. y  $d = 0.9$  p.u. continúa el procedimiento de selección, comparando las impedancias de fuente calculadas con las reales y rechazando finalmente la subrutina *SUB\_B* por diferir el valor de las impedancias calculadas con su valor real.

Las comparaciones realizadas en la última etapa del procedimiento de selección de la subrutina requieren que se conozcan las impedancias de fuente reales. En el caso de que no fuese posible determinar su valor, ambos resultados ( $d_B$  y  $d_C$ ) deben ser considerados para determinar el lugar de la línea en el que ha ocurrido el defecto. Como los casos en los que se realizan las comparaciones de la última etapa del procedimiento de selección coinciden con localizaciones cercanas al punto de intersección de los tramos de línea (0.7 a 0.9 p.u.), el servicio de restauración de la línea podría actuar considerando ambas localizaciones.

En cuanto a la precisión alcanzada en el cálculo de las distancias de falta en las subrutinas *SUB\_B* y *SUB\_C*, los errores son inferiores a 0.01 p.u. (o al 1%) para distancias superiores a 0.7 p.u.. A medida que estas distancias son más próximas al origen de los tramos de línea (donde se encuentran las fuentes de tensión equivalentes) el error aumenta, siendo el máximo alcanzado de 2.19 %.

Los errores de esta magnitud no serían adecuados para un caso real de localización de faltas en una línea multiterminal, debido a que se traducen en distancias superiores a un kilómetro. Esto resultaría inadmisibles a efectos de localizar de forma precisa el lugar de la falta por los equipos de personal encargados de la reparación de la zona de la línea afectada, para la rápida restitución de la línea a sus condiciones de operación normales.

Sin embargo, los elevados errores que aparecen en algunos casos en el cálculo de la distancia de falta a través de las subrutinas *SUB\_B* y *SUB\_C* no se deben al mal funcionamiento de estas subrutinas ni al del algoritmo en general. Por el contrario, estos errores son consecuencia de la discrepancia existente entre los modelos de línea

considerados por estas subrutinas para el cálculo de la distancia de falta y el considerado en la simulación de los cortocircuitos.

## 8.-SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

### 8.1.- Obtención de magnitudes cortocircuito más reales

En el capítulo 6 se pudo ver que, a diferencia de la subrutina *SUB\_A*, las subrutinas *SUB\_B* y *SUB\_C* consideran un modelo de línea larga o de parámetros distribuidos, mientras que las tensiones y corrientes de falta introducidas como entrada del algoritmo se calculan con un modelo de línea corta de parámetros no distribuidos.

La obtención de las variables de cortocircuito usando un modelo de línea larga o mediante un programa de simulación de cortocircuitos en condiciones más próximas a la realidad (como el programa *Alternate Transients Program (ATP)–Electromagnetic Transients Program (EMTP)*), conduciría a que los cálculos de la distancia de falta obtenidos tuviesen una precisión mayor.

Además de la utilización de programas de simulación de cortocircuitos, como el programa ATP-EMTP, para obtener magnitudes de cortocircuito más reales, se describen a continuación una serie de posibles mejoras que podrían introducirse en el algoritmo y que mejorarían la precisión de la falta.

### 8.2.- Cálculo preciso de corriente de falta usando las corrientes de secuencia directa superpuesta

En el caso de faltas trifásicas equilibradas, sólo las componentes de secuencia directa están contenidas en las señales de tensión e intensidad. En este caso la componente de secuencia directa de la corriente de falta total se calcula como la suma de las componentes de secuencia directa de las corrientes de cada tramo de línea. Sin embargo, se podría calcular como la suma de las corrientes de secuencia directa superpuesta (denotadas con “ $\Delta$ ”) de los terminales de línea A, B y C, respectivamente:

$$\underline{I}_{F1} = \Delta \underline{I}_{A1} + \Delta \underline{I}_{B1} + \Delta \underline{I}_{C1} \quad (17)$$

Las componentes de secuencia inversa, homopolar y directa superpuesta de las corrientes medidas serían utilizadas, al igual que en la versión base del algoritmo, en el cálculo de la corriente de falta total (4).

Esto aseguraría un cálculo preciso de la corriente de falta, debido a que se excluyen del cálculo las componentes de secuencia directa, para las cuales tiene una gran importancia el efecto de la capacidad de la línea.

Las componentes incrementales de secuencia directa también deberían ser utilizadas para el caso de una falta trifásica equilibrada a la hora de calcular las fuentes remotas de tensión detrás de los extremos B y C en la segunda etapa de selección de la subrutina válida (ecuaciones (15) y (16)).

### 8.3.- Compensación del efecto de la capacidad y extensión de la utilización del modelo de línea larga

La subrutina *SUB\_A* (Apartado 6.1.) se formula usando un modelo de línea de parámetros no distribuidos para el tramo de línea AT despreciando las capacidades de la línea. La subrutina *SUB\_B* (Subapartado 6.2.2.) aplica el modelo de parámetros

distribuidos de línea al transferir las señales al punto T [(9) y (10)], mientras que el modelo de bucle de falta (12) aplicado en la misma subrutina presenta un carácter no distribuido, cuya aplicación es válida sólo en líneas de corta longitud. Para la subrutina *SUB\_C* ocurre lo mismo.

La utilización del modelo de línea de parámetros distribuidos en las ecuaciones donde se utiliza un modelo simplificado se haría necesaria para mejorar la precisión de localización de falta por parte del algoritmo, especialmente si los tramos de línea tienen una longitud considerable (superior a los 100 km).

Para asegurar una alta precisión en la localización de la falta, es importante que la corriente de falta total en las tres subrutinas sea calculada de tal forma que se minimice el efecto de la capacidad de la línea, que se considera significativo en el caso de las componentes de secuencia directa.

Atendiendo a las características mencionadas de las subrutinas, el presente algoritmo para la localización de faltas es capaz de localizar las faltas con precisión suficiente si los tramos de línea no presentan una gran longitud.

En el caso de que la longitud de los tramos de línea fuese superior a 150 km, es necesario mejorar la precisión en la localización de la falta. Para lograrlo, considerando el modelo de línea de parámetros distribuidos, en primer lugar, se determina una caída de tensión en el respectivo tramo de línea en el que se ha producido la falta (Figura 16: tramo *A-FA* para la subrutina *SUB\_A*; tramo *T-FB* para la subrutina *SUB\_B*; tramo *T-FC* para la subrutina *SUB\_C*). Esto se consigue realizando cálculos iterativos.

Para mejorar todavía más la precisión en la localización de la falta, la corriente de falta total se podría determinar considerando el modelo de línea larga. Para ello, al considerar el flujo de corrientes en el recorrido *T-FB-B* (Figura 19), después de realizar una serie de manipulaciones sobre funciones hiperbólicas, se obtiene la siguiente fórmula compacta para determinar la *i-ésima* componente simétrica de la corriente de falta total:

$$I_{Fi} = \frac{-\frac{1}{Z_{ciLB}} \sinh(\gamma_{iLB} l_{LB}) * \underline{V}_{Ti} + \cosh(\gamma_{iLB} l_{LB}) * \underline{I}_{TBi} + \underline{I}_{Bi}}{\cosh(\gamma_{iLB} l_{LB} d_B)} \quad (18)$$

La corriente calculada (18) tiene que ser sustituida en la expresión (4) y después en el modelo de lazo de falta (12). Como resultado, se obtiene una compleja fórmula no lineal, que puede ser resuelta iterativamente usando, por ejemplo, el método de Newton-Raphson.

## 9.- CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo, que era el de desarrollar un algoritmo localizador de faltas para una línea de transmisión de electricidad de tres terminales, se ha alcanzado de manera satisfactoria.

La variable fundamental que se obtiene como salida de este algoritmo, cuya estructura y funcionamiento se han presentado en el Capítulo 6, es la distancia de falta medida desde el extremo del tramo de línea en el que ocurre el cortocircuito. El algoritmo es capaz de calcular con cierto nivel de precisión y de seleccionar el tramo de línea afectado utilizando como variables de entrada las tres intensidades medidas en cada uno de los extremos de la línea y la tensión medida en uno de los extremos. Es en este extremo, en el que se mide la tensión, donde se situaría el relé de corriente diferencial localizador de faltas, en el cual se implementaría el algoritmo.

La validez de las ecuaciones empleadas y del procedimiento de selección de la subrutina válida de entre las tres subrutinas que forman parte del algoritmo, se ha demostrado en el Capítulo 7 tras discutir los resultados a partir de simulaciones de casos de cortocircuito en una línea modelo de tres terminales.

De los resultados del Capítulo 7 se deduce que los desarrollos efectuados en los Capítulos 4 y 5, donde se obtienen de manera teórica las ecuaciones matemáticas que forman parte del algoritmo, son correctos.

Sin embargo, se ha comprobado que las simplificaciones consideradas en la línea modelo del Capítulo 3, así como el procedimiento de cálculo de cortocircuitos empleado en la simulación de los casos de cortocircuito, conducen a que la distancia de falta calculada por el algoritmo en los casos estudiados no sea lo suficientemente precisa como para poder aplicar el algoritmo en una situación real: los errores en el cálculo de la distancia respecto a la distancia real son en algunos casos superiores al 1 %. Este resultado no es admisible en un caso real, en el cual se necesita conocer con exactitud el lugar en el que ha ocurrido el defecto para proceder a reparar rápidamente el tramo de línea afectado para restituir las condiciones normales de operación.

El funcionamiento del algoritmo, especialmente en lo que se refiere a la precisión en el cálculo de la distancia de falta, debería de ser comprobado utilizando como variables de entrada unas magnitudes de fase de corrientes y tensiones de cortocircuito que se parezcan más a las señales que aparecerían en una situación de falta real. Estas señales podrían obtenerse a partir de un programa especializado en la simulación de cálculos de magnitudes transitorias de cortocircuitos, como el software ATP-EMTP, o bien utilizando un modelo de línea de parámetros distribuidos en la simulación de las situaciones de cortocircuito. Proceder de esta manera supondría ampliar en gran medida la extensión de este trabajo y por ello ha quedado fuera del alcance del mismo.

En cuanto a las posibles mejoras que podrían desarrollarse para aumentar la precisión de la distancia calculada por el algoritmo, han sido discutidas en el Capítulo 7. Estas mejoras se basan, en primer lugar, en la consideración del efecto de la capacidad de las líneas en los casos de líneas de elevadas longitudes (superiores a 80 km). También podría mejorarse la precisión del algoritmo extendiendo la utilización del modelo de línea de parámetros distribuidos a sus tres subrutinas y a todas las ecuaciones que intervienen en el cálculo de la distancia de falta. Esto último supondría aumentar la

complejidad del algoritmo en gran medida, debiendo recurrir a la programación de métodos de cálculo iterativos.

En definitiva, el algoritmo localizador de faltas desarrollado se considera válido como prototipo y como verificador de la validez del método de evaluación de la distancia de falta de los relés diferenciales para una línea de tres terminales, desarrollado en este trabajo. Sin embargo, para su aplicación en una situación real de localización de faltas en una línea, se debe probar su funcionamiento con señales reales de tensiones y corrientes de cortocircuito. Además, se deben introducir una serie de mejoras que aumenten la precisión en la localización de la falta, especialmente para casos de líneas con tramos de grandes longitudes, lo que aumentaría la complejidad del algoritmo.



## 10.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] *A fault-location method for application with current differential relays of three-terminal lines*; Autores: Jan Izykowski, Eugeniusz Rosolowski, Murari Mohan Saha, Marek Fulczyk, Przemyslaw Balcerek; IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 4, Octubre 2007
- [2] *IEEE Guide for determining fault location on AC transmission and distribution lines*; Autores: IEEE Power Engineering Society, EEUU Junio 2005
- [3] *A new location algorithm for use with current differential protective relays of two-terminal lines*; Autores: Jan Izykowski, Eugeniusz Rosolowski, Murari Mohan Saha; Enero 2008
- [4] *A new fault locator for three-terminal transmission lines using two-terminal synchronized voltage and current phasors*; Autores: Ying-Hong Lin, Chih-Wen Liu, Member, Chi-Shan Yu; IEEE Transactions on power delivery, VOL. 17, NO. 2, APRIL 2002
- [5] *Accurate locations of faults in parallel transmission lines under availability of measurements from one circuit only*; Autores: Jan Izykowski, Rafal Kawecki, Eugeniusz Rosolowski, Murari Mohan Saha; 14th PSCC, Sevilla, Junio 2002
- [6] *Modern Line Current Differential Protection Solutions*; Autores: Hank Miller, John Burger, Normann Fischer, Bodgan Kasztenny; Publicado en: *Line current differential protection: A collection of technical papers representing modern solutions*, 2014
- [7] *Análisis de sistemas de potencia*; Autores: J.J. Grainger y W.D. Stevenson Jr. Ed. McGraw-Hill, 1995
- [8] *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*. Autor: A. Gómez Expósito. Ed. McGraw Hill, 2002
- [9] *Sistemas de energía eléctrica*; Autor: Fermón Barrero; S.A. Ediciones Paraninfo, 2004
- [10] *Metodología para la detección y localización de faltas en redes de distribución con puesta a tierra activa*; Autor: Garikoitz Buigues Beraza; Universidad del País Vasco, 2011
- [11] *Apuntes de componentes simétricas*; Cátedra de Teoría de circuitos, ICAI, 2006
- [12] *Cálculo eléctrico de líneas de transmisión*; Autor: Gustavo Adolfo Nava Bustillo; U.T.O. Facultad Nacional de Ingeniería Bolivia, 2010

## 11.-PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO

Para realizar la planificación de las tareas llevadas a cabo en este trabajo, se ha empleado el diagrama de Gantt. Esta herramienta es ampliamente utilizada en la dirección de proyectos debido a su facilidad de lectura, ya que permite realizar una representación gráfica del desarrollo del proyecto.

El tiempo dedicado por el autor de este trabajo ha sido de 348 horas, con una dedicación semanal de 10.23 horas de media, entre los meses de febrero y septiembre de 2016.

En la Tabla 13 puede verse la descomposición del proyecto en sus tareas principales.

Tarea	Fecha inicio	Horas	Fecha fin
Reunión tutor-alumno previa a iniciación de TFM	01/02/2016	2	01/02/2016
Estudio de problema de localización de faltas en líneas multiterminal en bibliografía específica y artículos relacionados	01/02/2016	35	21/02/2016
Programación de simulaciones de casos de falta particulares	21/02/2016	40	13/03/2016
Reunión de seguimiento tutor-alumno	14/03/2016	2	14/03/2016
Programación de versión básica del algoritmo localizador de faltas	14/03/2016	50	10/04/2016
Reunión de seguimiento tutor-alumno	11/04/2016	2	11/04/2016
Ampliación de programación de simulaciones de casos de falta particulares	11/04/2016	30	01/05/2016
Ampliación de alcance y mejoras de algoritmo localizador de faltas	02/05/2016	40	29/05/2016
Reunión seguimiento tutor-alumno	30/05/2016	2	30/05/2016
Redacción de memoria del TFM-Parte teórica	30/05/2016	45	26/06/2016
Revisión de aspectos de funcionamiento de algoritmo y ampliación de simulaciones de casos particulares de falta	27/06/2016	20	10/07/2016
Redacción de memoria del TFM-Parte práctica (algoritmo y discusión de resultados)	11/07/2016	40	07/08/2016
Revisión y últimos ajustes de documento de memoria del TFM	08/08/2016	15	21/08/2016
Preparación de entrega de memoria de TFM y última reunión y revisión con tutor	29/08/2016	10	11/09/2016
Elaboración de presentación de TFM	12/09/2016	15	25/09/2016
<b>Total</b>	<b>01/02/2016</b>	<b>348</b>	<b>25/09/2016</b>

Tabla 13: Descomposición de las tareas del proyecto

El diagrama de Gantt del proyecto es el que se muestra en la siguiente figura:

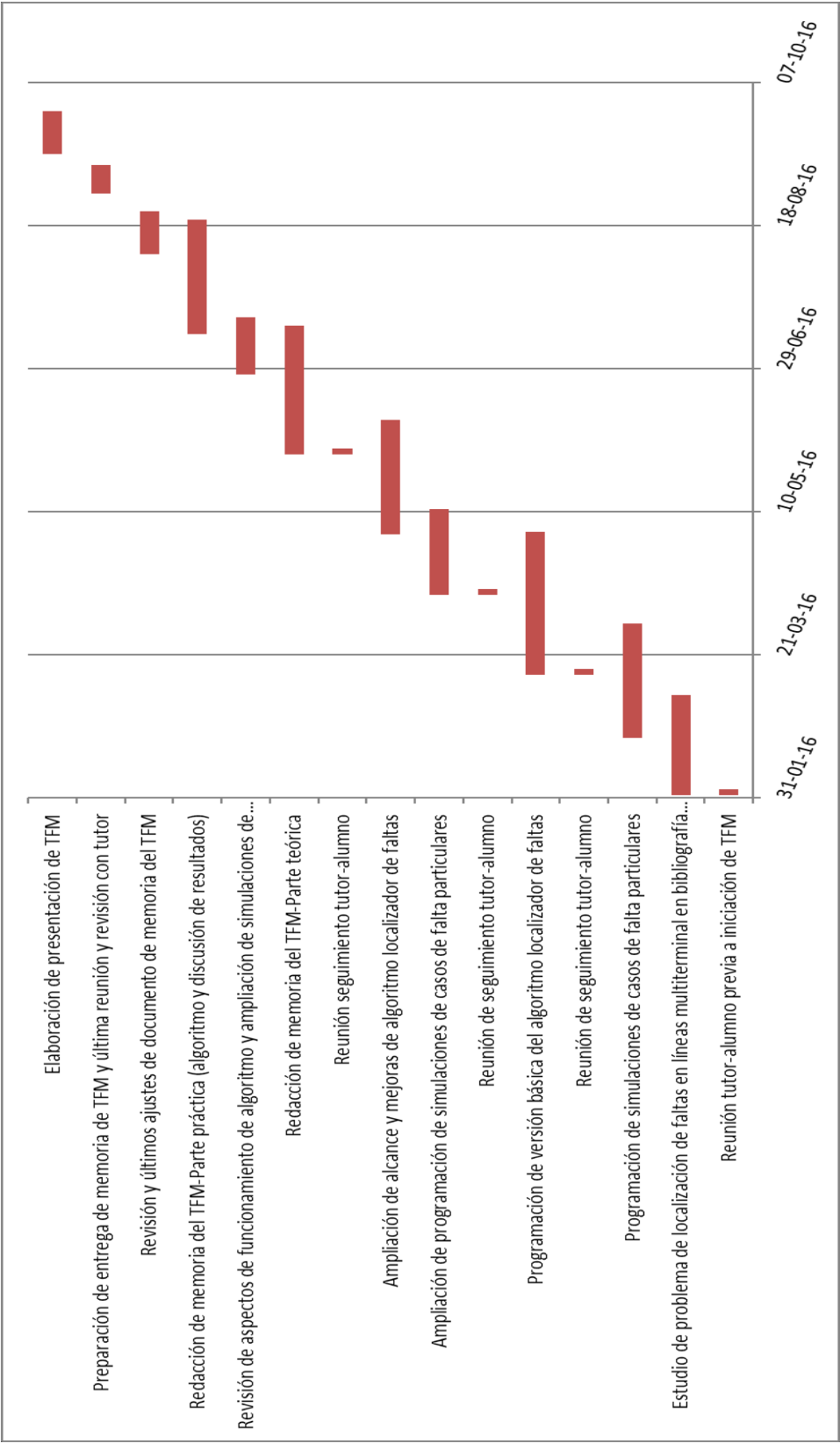


Figura 20: Diagrama de Gantt del proyecto

Los recursos principales empleados para la elaboración de este proyecto han sido los propios del autor (tiempo de trabajo dedicado, competencias y habilidades de ingeniería, conocimientos adquiridos durante la carrera de ingeniería eléctrica y programación, etc.) y una serie de recursos informáticos (Matlab, Microsoft Office Excel, Word y Power Point, Internet).

En cuanto a los costes variables asociados a la realización de este proyecto se consideran las horas de trabajo totales dedicadas por el autor. Siendo 348 las horas de trabajo dedicadas y considerando un salario medio para un Ingeniero Industrial sin experiencia laboral en España de 16 €/hora (según el portal web TuSalario.es), se obtiene el siguiente coste asociado a las horas de trabajo del autor:

$$16 * 348 = 5568 \text{ €}$$

Como costes fijos asociados al proyecto, se consideran los recursos informáticos. Se ha utilizado un ordenador portátil valorado en 500 €. En dicho ordenador se ha empleado la versión de Matab *R2015a*, cuya licencia para estudiantes tiene un valor de 55 €, y una licencia de Microsof Office 365 valorada en 69 €. En total el coste de los recursos informáticos es de 594 €.

El desglose del presupuesto se resume en la siguiente tabla:

Mes	Horas	Horas acumuladas	Coste variable	Coste variable	Coste	Coste
Febrero	50.4	50.4	806.4	806.4	624	1430.4
Marzo	62	112.4	992	1798.4		2422.4
Abril	48.7	161.1	779.2	2577.6		3201.6
Mayo	42	203.1	672	3249.6		3873.6
Junio	50	253.1	800	4049.6		4673.6
Julio	45	298.1	720	4769.6		5393.6
Agosto	30	328.1	480	5249.6		5873.6
Septiembre	20	348.1	320	5569.6		6193.6
<b>Total</b>	<b>348.1</b>	<b>348.1</b>	<b>5569.6</b>	<b>5569.6</b>	<b>624</b>	<b>6193.6</b>

Tabla 14: Desglose del presupuesto del proyecto

## ANEXO I. MODELO DE LÍNEA DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS

Para obtener una representación de una línea de transmisión larga que se aproxime a la realidad, debe considerarse la longitud incremental de la línea y tenerse en cuenta el efecto de la capacidad distribuida y su relación con la impedancia de la línea.

Tomando de forma teórica un número infinito de segmentos de la línea se obtiene una mayor exactitud, lo que requiere de una solución de ecuaciones diferenciales.

En la siguiente figura se puede ver una representación infinitesimal de una sección de una línea de transmisión:

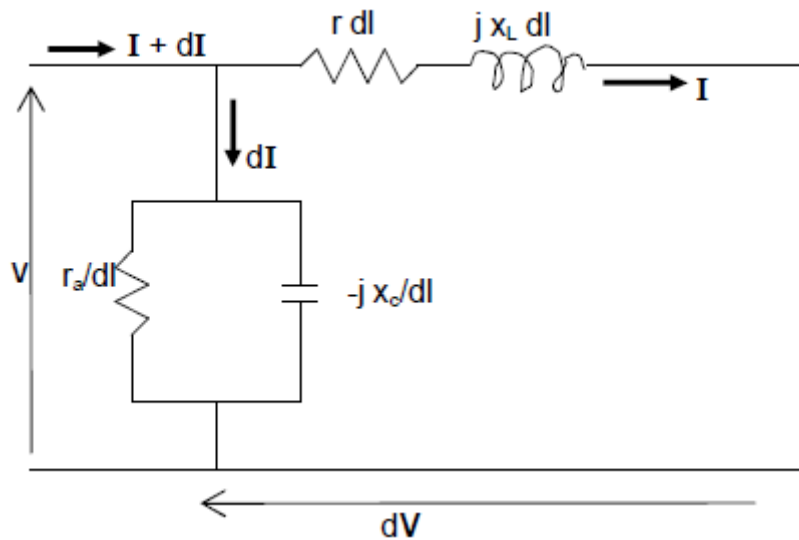


Figura 21: Esquema diferencial de una línea de transmisión. Fuente: U.T.O. F.N.I. - LINEAS DE TRANSMISION- Ing. Gustavo Adolfo Nava Bustillo

- $r$  = Resistencia efectiva por unidad de longitud ( $\Omega/\text{km}$ )
- $x_L$  = Reactancia inductiva por unidad de longitud ( $\Omega/\text{km}$ )
- $\underline{z} = r + j x_L$  = Impedancia en serie por unidad de longitud ( $\Omega/\text{km}$ )
- $r_a$  = Resistencia de aislamiento por unidad de longitud ( $\Omega\text{-km}$ )
- $x_C$  = Reactancia capacitiva por unidad de longitud ( $\Omega\text{-km}$ )
- $\underline{z}_C = 1/\underline{y}$  = Impedancia en paralelo por unidad de longitud ( $\Omega\text{-km}$ )
- $\underline{y}$  = Admitancia en paralelo por unidad de longitud ( $\text{S}/\text{km}$ )
- $dl$  = Longitud del tramo diferencial de línea
- $\underline{z} dl$  = Impedancia en serie del tramo de línea de longitud  $dl$  ( $\Omega$ )
- $\underline{y} dl$  = Admitancia en paralelo del tramo de línea de longitud  $dl$  ( $\text{S}$ )

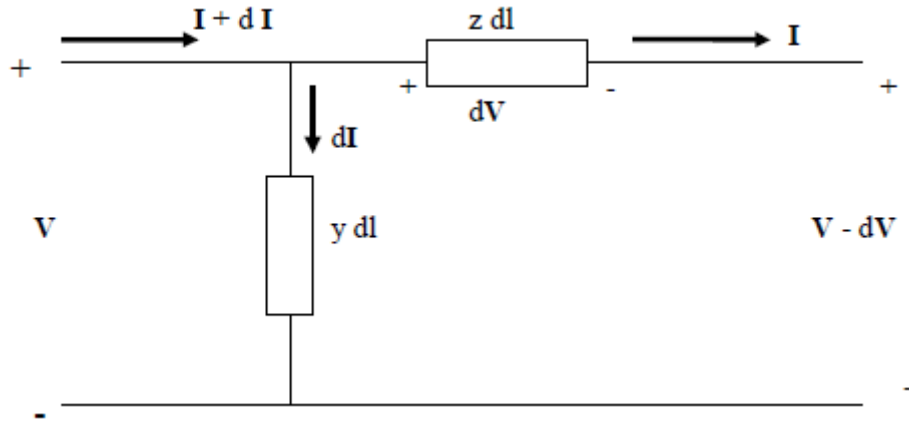


Figura 22: Esquema diferencial de una línea de transmisión a partir del que se obtiene el modelo de parámetros distribuidos. Fuente: U.T.O. F.N.I. - LINEAS DE TRANSMISION-Ing. Gustavo Adolfo Nava Bustillo

Del circuito:

$$d\underline{V} = \underline{I}zdl \quad \frac{d\underline{V}}{dl} = \underline{I}z \quad (A)$$

$$d\underline{I} = \underline{V}ydl \quad \frac{d\underline{I}}{dl} = \underline{V}y \quad (B)$$

Derivando (A) y (B) respecto a  $l$ :

$$\frac{d^2\underline{V}}{dl^2} = \frac{d\underline{I}}{dl}z \quad (C)$$

$$\frac{d^2\underline{I}}{dl^2} = \frac{d\underline{V}}{dl}y \quad (D)$$

Sustituyendo (B) en (C) y (A) en (D):

$$\frac{d^2\underline{V}}{dl^2} = \underline{V}zy \quad (E) \quad \text{Ec. diferenciales lineales homogéneas}$$

$$\frac{d^2\underline{I}}{dl^2} = \underline{I}zy \quad (F)$$

De la ecuación (E) se deduce que la derivada segunda de la función  $\underline{V}$  es igual a la misma función multiplicada por una constante ( $zy$ ), y la función que presenta esta propiedad es la función exponencial:

$$\underline{V} = ke^{ml} \quad \text{donde } k \text{ y } m \text{ son constantes}$$

Entonces:

$$\frac{d\underline{V}}{dl} = kme^{ml} = m\underline{V}$$

$$\frac{d^2\underline{V}}{dl^2} = km^2e^{ml} = m^2\underline{V}$$

Sustituyendo en (E):

$$m^2\underline{V} = \underline{V}zy \quad \text{de donde} \quad m = \pm \sqrt{zy}$$

Sustituyendo el valor de  $m$ :

$$\underline{V} = k_1 e^{\sqrt{zy}l} + k_2 e^{-\sqrt{zy}l} \quad (G)$$

Según las relaciones de Euler:

$$\frac{e^x + e^{-x}}{2} = \cosh x$$

$$\frac{e^x - e^{-x}}{2} = \sinh x$$

Sumando las dos expresiones anteriores:  $e^x = \cosh x + \sinh x$

Y restando las mismas expresiones:  $e^{-x} = \cosh x - \sinh x$

Sustituyendo en la ecuación (G):

$$\underline{V} = k_1 (\cosh \sqrt{zy}l + \sinh \sqrt{zy}l) + k_2 (\cosh \sqrt{zy}l - \sinh \sqrt{zy}l)$$

Ordenando y factorizando:

$$\underline{V} = (k_1 + k_2) \cosh \sqrt{zy}l + (k_1 - k_2) \sinh \sqrt{zy}l \quad (H)$$

Derivando respecto a  $l$ :

$$\frac{dV}{dl} = (k_1 + k_2) \sqrt{zy} \sinh \sqrt{zy}l + (k_1 - k_2) \sqrt{zy} \cosh \sqrt{zy}l$$

De la ecuación (A) se tenía:

$$\frac{dV}{dl} = \underline{I}Z \quad \text{Por lo que:} \quad \underline{I} = \frac{1}{Z} \frac{dV}{dl}$$

$$\underline{I} = \frac{1}{Z} [(k_1 + k_2) \sqrt{zy} \sinh \sqrt{zy}l + (k_1 - k_2) \sqrt{zy} \cosh \sqrt{zy}l]$$

$$\underline{I} = (k_1 + k_2) \sqrt{\frac{y}{z}} \sinh \sqrt{zy}l + (k_1 - k_2) \sqrt{\frac{y}{z}} \cosh \sqrt{zy}l \quad (J)$$

Las constantes  $k_1$  y  $k_2$  se pueden obtener con las siguientes condiciones de contorno:

$$\text{Si } l = 0 \text{ entonces } \underline{I} = \underline{I}_R \text{ y } \sinh(0) = 0$$

$$\underline{V} = \underline{V}_R \text{ y } \cosh(0) = 1$$

Sustituyendo en (H) y (J):

$$\underline{V}_R = k_1 + k_2$$

$$\underline{I}_R = (k_1 - k_2) \sqrt{\frac{y}{z}} \text{ es decir } k_1 - k_2 = \underline{I}_R \sqrt{\frac{z}{y}}$$

Sustituyendo a su vez en las ecuaciones (H) y (J):

$$\underline{V} = \underline{V}_R \cosh \sqrt{zy}l + \underline{I}_R \sqrt{\frac{z}{y}} \sinh \sqrt{zy}l \quad (M)$$

$$\underline{I} = \underline{V}_R \sqrt{\frac{y}{z}} \sinh \sqrt{zy}l + \underline{I}_R \cosh \sqrt{zy}l$$

Las ecuaciones anteriores permiten obtener la tensión y la corriente en un punto cualquiera de la línea a una distancia  $l$  del extremo receptor.



## ANEXO II. CÓDIGO DEL ALGORITMO LOCALIZADOR DE FALTAS

```
function
[tramo,distancia,R_falta]=TFM_LocalizacionFaltasLineas3Terminales(V_A,
I_A,I_B,I_C)

%DEFINICIÓN DE VARIABLES
%Coeficientes de ponderación:
%a.Coeficientes de ponderación para las señales del bucle de falta:
syms a1 a2 a0
%b.Coeficientes de ponderación usados en el modelo de falta:
syms aF1 aF2 aF0

%Datos del sistema (Tensiones en V, líneas en km e impedancias en
ohm/km)
%Impedancias de fuentes equivalentes (ohmios)
Z1sA=0.65125+1i*3.693;
Z0sA=1.159+1i*6.5735;

Z1sB=2*Z1sA;
Z0sB=2*Z0sA;

Z1sC=3*Z1sA;
Z0sC=3*Z0sA;

%Longitud Líneas (km)
LAT=100;
LBT=80;
LCT=50;

%Impedancias de líneas (ohm/km)
z1l=0.0276+1i*0.3151;
z0l=0.275+1i*1.0265;

%Impedancias de línea en ohm
Z1lAT=z1l*LAT;
Z1lBT=z1l*LBT;
Z1lCT=z1l*LCT;

Z0lAT=z0l*LAT;
Z0lBT=z0l*LBT;
Z0lCT=z0l*LCT;

%Admitancias en paralelo de las líneas (S/km)
y1l=1i*0.0000038;
y0l=1i*0.0000025;

%Impedancias características de la línea (ohm)
Zc0L=sqrt(z0l/y0l);
Zc1L=sqrt(z1l/y1l);

%Constantes de propagación (1/km)
gamma0L=sqrt(z0l*y0l);
gamma1L=sqrt(z1l*y1l);
```

```

%Tensiones de fase de fuentes equivalentes (V)
UsA=110E3/sqrt(3);
UsB=110E3/sqrt(3)*(cos(-30*pi/180)+1i*sin(-30*pi/180));
UsC=110E3/sqrt(3)*(cos(-15*pi/180)+1i*sin(-15*pi/180));

%Selección de coeficientes de ponderación a emplear según tipo de
falta
tipo_falta=input('Indica el tipo de falta
(ag,bg,cg,ab,bc,ca,abg,bcg,cag,abc,abcg): ');
switch tipo_falta
    case 'ag'
        a1=1;a2=1;a0=1;aF1=0;aF2=3;aF0=0;
    case 'bg'
        a1=-0.5-
1i*0.5*sqrt(3);a2=0.5+1i*0.5*sqrt(3);a0=1;aF1=0;aF2=1.5+1i*1.5*sqrt(3)
;aF0=0;
    case 'cg'
        a1=0.5+1i*0.5*sqrt(3);a2=-0.5-1i*0.5*sqrt(3);a0=1;aF1=0;aF2=-
1.5-1i*1.5*sqrt(3);aF0=0;
    case 'ab'
        a1=1.5+1i*0.5*sqrt(3);a2=1.5-
1i*0.5*sqrt(3);a0=0;aF1=0;aF2=1.5-1i*0.5*sqrt(3);aF0=0;
    case 'bc'
        a1=-1i*sqrt(3);a2=1i*sqrt(3);a0=0;aF1=0;aF2=1i*sqrt(3);aF0=0;
    case 'ca'
        a1=-1.5+1i*0.5*sqrt(3);a2=-1.5-1i*0.5*sqrt(3);a0=0;aF1=0;aF2=-
1.5-1i*0.5*sqrt(3);aF0=0;
    case 'abg'
        a1=1.5+1i*0.5*sqrt(3);a2=1.5-1i*0.5*sqrt(3);a0=0;aF1=0;aF2=3-
1i*sqrt(3);aF0=1i*sqrt(3);
    case 'bcg'
        a1=-
1i*sqrt(3);a2=1i*sqrt(3);a0=0;aF1=0;aF2=1i*2*sqrt(3);aF0=1i*sqrt(3);
    case 'cag'
        a1=-1.5+1i*0.5*sqrt(3);a2=-1.5-1i*0.5*sqrt(3);a0=0;aF1=0;aF2=-
3-1i*sqrt(3);aF0=1i*sqrt(3);
    case 'abc'
        a1=1.5+1i*0.5*sqrt(3);a2=1.5-
1i*0.5*sqrt(3);a0=0;aF1=1.5+1i*0.5*sqrt(3);aF2=1.5-
1i*0.5*sqrt(3);aF0=0;
    case 'abcg'
        a1=1.5+1i*0.5*sqrt(3);a2=1.5-
1i*0.5*sqrt(3);a0=0;aF1=1.5+1i*0.5*sqrt(3);aF2=1.5-
1i*0.5*sqrt(3);aF0=0;
    otherwise
        disp('Tipo de falta no válido'); return
end

%Cálculo de componentes simétricas de tensiones y corrientes
A=[1 1 1;
1 (cos(-120*pi/180)+1i*sin(-120*pi/180))
(cos(120*pi/180)+1i*sin(120*pi/180));
1 (cos(120*pi/180)+1i*sin(120*pi/180)) (cos(-120*pi/180)+1i*sin(-
120*pi/180))];

V_Asim=A\V_A;
I_Asim=A\I_A;
I_Bsim=A\I_B;
I_Csim=A\I_C;

```

```

V_A0=V_Asim(1);
V_A1=V_Asim(2);
V_A2=V_Asim(3);

I_A0=I_Asim(1);
I_A1=I_Asim(2);
I_A2=I_Asim(3);

I_B0=I_Bsim(1);
I_B1=I_Bsim(2);
I_B2=I_Bsim(3);

I_C0=I_Csim(1);
I_C1=I_Csim(2);
I_C2=I_Csim(3);

%Cálculo de corriente de falta para usar en bucles de falta de todas
las
%subrutinas
I_F0=I_A0+I_B0+I_C0;
I_F1=I_A1+I_B1+I_C1;
I_F2=I_A2+I_B2+I_C2;
I_F=aF1*I_F1+aF2*I_F2+aF0*I_F0;

%Transferencia de tensión del extremo A hasta el punto T (para usar en
%subrutinas SUB_B y SUB_C)
V_T0transf=cosh(gamma0L*LAT)*V_A0-Zc0L*sinh(gamma0L*LAT)*I_A0;
V_T1transf=cosh(gamma1L*LAT)*V_A1-Zc1L*sinh(gamma1L*LAT)*I_A1;
V_T2transf=cosh(gamma1L*LAT)*V_A2-Zc1L*sinh(gamma1L*LAT)*I_A2;

V_Tp=a1*V_T1transf+a2*V_T2transf+a0*V_T0transf;

%Transferencia de la corriente del extremo A hasta el punto T (para
usar en
%subrutinas SUB_B y SUB_C)
I_A0transf=-sinh(gamma0L*LAT)*V_A0/Zc0L+cosh(gamma0L*LAT)*I_A0;
I_A1transf=-sinh(gamma1L*LAT)*V_A1/Zc1L+cosh(gamma1L*LAT)*I_A1;
I_A2transf=-sinh(gamma1L*LAT)*V_A2/Zc1L+cosh(gamma1L*LAT)*I_A2;

%A. Subrutina SUB_A

%Corriente y tensión del bucle de falta
V_Ap=a1*V_A1+a2*V_A2+a0*V_A0;
I_Ap=a1*I_A1+a2*I_A2+a0*Z0LAT/Z1LAT*I_A0;

%Cálculo de distancia a la falta desde extremo A
d_A=(real(V_Ap)*imag(I_F)-
imag(V_Ap)*real(I_F))/(real(Z1LAT*I_Ap)*imag(I_F)-
imag(Z1LAT*I_Ap)*real(I_F));

%Cálculo de resistencia de falta R_fA
R_fA=(real(V_Ap)-d_A*real(Z1LAT*I_Ap))/real(I_F);

%B. Subrutina SUB_B

```

```

%Transferencia de corriente del extremo C hasta T
I_C0transfB=I_C0/cosh(gamma0L*LCT)-V_T0transf/Zc0L*tanh(gamma0L*LCT);
I_C1transfB=I_C1/cosh(gamma1L*LCT)-V_T1transf/Zc1L*tanh(gamma1L*LCT);
I_C2transfB=I_C2/cosh(gamma1L*LCT)-V_T2transf/Zc1L*tanh(gamma1L*LCT);

%Cálculo de la corriente transferida del tramo de línea TB
I_TB0transfB=I_A0transf+I_C0transfB;
I_TB1transfB=I_A1transf+I_C1transfB;
I_TB2transfB=I_A2transf+I_C2transfB;

%Cálculo de corriente de bucle para subrutina SUB_B
I_TBp=a1*I_TB1transfB+a2*I_TB2transfB+a0*I_TB0transfB;

%Cálculo de distancia a la falta desde el extremo B
d_B=(real(I_F)*imag(V_Tp)-
imag(I_F)*real(V_Tp))/(imag(Z11BT*I_TBp)*real(I_F)-
real(Z11BT*I_TBp)*imag(I_F));
d_B=1-d_B;

%Cálculo de resistencia de falta R_fB
R_fB=(real(V_Tp)-(1-d_B)*real(Z11BT*I_TBp))/(real(I_F));

%Cálculo de impedancia de fuente detrás de la barra B (secuencia
inversa necesaria para segundo
%paso de selección de subrutina válida
V_B2_SUB_B=V_T2transf-(1-d_B)*Z11BT*I_TB2transfB+d_B*Z11BT*I_B2;
Z_2sB_SUB_B=-V_B2_SUB_B/I_B2;
V_C2_SUB_B=V_T2transf+I_C2*Z11CT;
Z_2sC_SUB_B=-V_C2_SUB_B/I_C2;

%C. Subrutina SUB_C

%Transferencia de corriente del punto T hasta el extremo B (para usar
en
%subrutina SUB_C)
I_B0transfC=I_B0/cosh(gamma0L*LBT)-V_T0transf/Zc0L*tanh(gamma0L*LBT);
I_B1transfC=I_B1/cosh(gamma1L*LBT)-V_T1transf/Zc1L*tanh(gamma1L*LBT);
I_B2transfC=I_B2/cosh(gamma1L*LBT)-V_T2transf/Zc1L*tanh(gamma1L*LBT);

%Cálculo de la corriente transferida del tramo de línea TC
I_TC0transfC=I_A0transf+I_B0transfC;
I_TC1transfC=I_A1transf+I_B1transfC;
I_TC2transfC=I_A2transf+I_B2transfC;

%Cálculo de corriente de bucle para subrutina SUB_C
I_TCp=a1*I_TC1transfC+a2*I_TC2transfC+a0*I_TC0transfC;

%Cálculo de distancia a la falta desde el extremo C
d_C=(real(I_F)*imag(V_Tp)-
imag(I_F)*real(V_Tp))/(imag(Z11CT*I_TCp)*real(I_F)-
real(Z11CT*I_TCp)*imag(I_F));
d_C=1-d_C;

%Cálculo de resistencia de falta R_fC
R_fC=(real(V_Tp)-(1-d_C)*real(Z11CT*I_TCp))/(real(I_F));

```

```

%Cálculo de impedancia de fuente detrás de la barra B (secuencia
inversa
%, necesaria para segundo
%paso de selección de subrutina válida
V_C2_SUB_C=V_T2transf-(1-d_C)*Z11CT*I_TC2transfC+d_C*Z11CT*I_C2;
Z_2sC_SUB_C=-V_C2_SUB_C/I_C2;
V_B2_SUB_C=V_T2transf+I_B2*Z11BT;
Z_2sB_SUB_C=-V_B2_SUB_C/I_B2;

%SELECCIÓN DE LA SUBROUTINA VÁLIDA
if
((d_A>=0)&&(d_A<=1)&&(R_fA>=0))&&((d_B<0)|| (d_B>1)|| (R_fB<0))&&((d_C<0)
)|| (d_C>1)|| (R_fC<0))
    disp('Subrutina válida es la SUB_A');
    tramo='A';
    distancia=d_A;
    R_falta=R_fA;
else if
((d_B>=0)&&(d_B<=1)&&(R_fB>=0))&&((d_A<0)|| (d_A>1)|| (R_fA<0))&&((d_C<0)
)|| (d_C>1)|| (R_fC<0))
    disp('Subrutina válida es la SUB_B');
    tramo='B';
    distancia=d_B;
    R_falta=R_fB;
else if
((d_C>=0)&&(d_C<=1)&&(R_fC>=0))&&((d_A<0)|| (d_A>1)|| (R_fA<0))&&((d_C<0)
)|| (d_C>1)|| (R_fC<0))
    disp('Subrutina válida es la SUB_C');
    tramo='C';
    distancia=d_C;
    R_falta=R_fC;
else %Continuar con el siguiente paso de la selección de la
subrutina válida
    if
((real(Z_2sB_SUB_B)>0)&&(imag(Z_2sB_SUB_B)>0)&&(real(Z_2sC_SUB_B)>0)&&
(imag(Z_2sC_SUB_B)>0))&&((real(Z_2sC_SUB_C)<0)|| (imag(Z_2sC_SUB_C)<0)||
(real(Z_2sB_SUB_C)<0)|| (imag(Z_2sB_SUB_C)<0))
        disp('Subrutina válida es la SUB_B');
        tramo='B';
        distancia=d_B;
        R_falta=R_fB;
    else if
((real(Z_2sC_SUB_C)>0)&&(imag(Z_2sC_SUB_C)>0)&&(real(Z_2sB_SUB_C)>0)&&
(imag(Z_2sB_SUB_C)>0))&&((real(Z_2sB_SUB_B)<0)|| (imag(Z_2sB_SUB_B)<0)||
(real(Z_2sC_SUB_B)<0)|| (imag(Z_2sC_SUB_B)<0))
        disp('Subrutina válida es la SUB_C');
        tramo='C';
        distancia=d_C;
        R_falta=R_fC;
    else %Último paso de selección (si fallan los
anteriores)
        if (abs(Z_2sB_SUB_B/Z1sB)<abs(Z_2sC_SUB_C/Z1sC))
            disp('Subrutina válida es la SUB_B');
            tramo='B';
            distancia=d_B;
            R_falta=R_fB;
        else
            disp('Subrutina válida es la SUB_C');
            tramo='Tramo C';
            distancia=d_C;

```

```
        R_falta=R_fC;  
    end  
end  
end  
end  
end  
end  
end  
  
if nargout<3, disp('Introduce número de salidas válido (3) para  
obtener los resultados'); return, end  
end
```

## ANEXO III. CÓDIGO UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN DE SITUACIÓN DE FALTA TIPO *b-c-g* (EN TRAMO *B-T*)

```
%Datos del sistema (Tensiones en V, líneas en km e impedancias en ohm/km)
%Impedancias de fuentes equivalentes (ohmios)
Z1sA=0.65125+1i*3.693;
Z0sA=1.159+1i*6.5735;
Z1sB=2*Z1sA;
Z0sB=2*Z0sA;
Z1sC=3*Z1sA;
Z0sC=3*Z0sA;

%Longitud Líneas (km)
LAT=100;
LBT=80;
LCT=50;

%Impedancias de líneas (ohm/km)
Z1l=0.0276+1i*0.3151;
Z0l=0.275+1i*1.0265;

%Impedancias de línea en ohm
Z1lAT=Z1l*LAT;
Z1lBT=Z1l*LBT;
Z1lCT=Z1l*LCT;
Z0lAT=Z0l*LAT;
Z0lBT=Z0l*LBT;
Z0lCT=Z0l*LCT;

%Resistencia de falta (ohm)
Rf=10;
%Resistencia a tierra (ohm)
Rg=10;

%Tensiones de fase de fuentes equivalentes (V)
UsA=110E3/sqrt(3);
UsB=110E3/sqrt(3)*(cos(-30*pi/180)+1i*sin(-30*pi/180));
UsC=110E3/sqrt(3)*(cos(-15*pi/180)+1i*sin(-15*pi/180));

%FALTA BIFÁSICA A TIERRA EN FASES B Y C en tramo de línea BT-ANÁLISIS DEL SISTEMA POR SUPERPOSICIÓN
d=0.9; %d es la distancia (en p.u.) desde el extremo A hasta el punto de falta

%1.SECUENCIA DIRECTA-Resolución del circuito en condiciones de prefalta
%1.1. Cálculo de matriz de admitancias y Zbarra
Yn=[1/Z1sA+1/Z1lAT 0 0 -1/Z1lAT 0;
0 1/Z1sB+1/(Z1lBT*d) 0 0 -1/(Z1lBT*d);
0 0 1/Z1sC+1/Z1lCT -1/Z1lCT 0;
-1/Z1lAT 0 -1/Z1lCT 1/Z1lAT+1/Z1lCT+1/((1-d)*Z1lBT) -1/(Z1lBT*(1-d));
0 -1/(Z1lBT*d) 0 -1/(Z1lBT*(1-d)) 1/(d*Z1lBT)+1/((1-d)*Z1lBT)];
Zbarra=inv(Yn);

%1.2. Vector de intensidades nodales
iMN=[UsA/Z1sA;UsB/Z1sB;UsC/Z1sC;0;0];
```

```

%1.3. Cálculo de tensiones en los nodos
Un=Zbarra*iMN;
U_Alo=Un(1);
U_Blo=Un(2);
U_Clo=Un(3);
U_Tlo=Un(4);
U_Plo=Un(5);

%2.Cálculo de impedancia equivalente Thevenin de SECUENCIA DIRECTA en
punto de falta P
Zeq1=Zbarra(5,5);

%3. Cálculo de impedancia equivalente Thevenin de SECUENCIA INVERSA en
%punto de falta
Zeq2=Zeq1;

%4. Cálculo de impedancia equivalente Thevenin de SECUENCIA HOMOPOLAR
en
%punto de falta
%4.1. Cálculo de matriz de admitancias y Zbarra para secuencia
homopolar
Yn_hom=[1/Z0sA+1/Z0lAT 0 0 -1/Z0lAT 0;
0 1/Z0sB+1/(Z0lBT*d) 0 0 -1/(Z0lBT*d);
0 0 1/Z0sC+1/Z0lCT -1/Z0lCT 0;
-1/Z0lAT 0 -1/Z0lCT 1/Z0lAT+1/Z0lCT+1/((1-d)*Z0lBT) -1/(Z0lBT*(1-d));
0 -1/(Z0lBT*d) 0 -1/(Z0lBT*(1-d)) 1/(d*Z0lBT)+1/((1-d)*Z0lBT)];
Zbarra_hom=inv(Yn_hom);

%4.2. Impedancia equivalente Thevenin de SECUENCIA HOMOPOLAR en
%punto de falta
Zeq0=Zbarra_hom(5,5);

%5.Cálculo de componentes simétricas de la intensidad de falta en el
punto
%de falta
Zeq02=(Rf+Zeq2)*(Zeq0+Rf+3*Rg)/(2*Rf+Zeq2+Zeq0+3*Rg);
If1=U_Plo/(Zeq1+Rf+Zeq02);
If2=-If1*(Zeq0+Rf+3*Rg)/(2*Rf+Zeq2+Zeq0+3*Rg);
If0=-If1-If2;
If=3*If0;

%6. Cálculo de componentes simétricas de las tensiones y corrientes de
falta
%6.1. Tensiones de falta de secuencia directa
%(=Tensión prefalta en cada barra + cambios en tensiones en los nudos
debido a corriente
%-If1 inyectada en punto P por la falta)
U_Alf=U_Alo-Zbarra(1,5)*If1;
U_Blf=U_Blo-Zbarra(2,5)*If1;
U_Clf=U_Clo-Zbarra(3,5)*If1;
U_Tlf=U_Tlo-Zbarra(4,5)*If1;
U_Plf=U_Plo-Zbarra(5,5)*If1;

%6.2. Cálculo de corrientes de falta en red de secuencia directa
I_Alf=(U_Alf-U_Tlf)/Z1lAT;
I_Blf=(U_Blf-U_Plf)/(d*Z1lBT);
I_Clf=(U_Clf-U_Tlf)/Z1lCT;
%6.3. Cálculo de las tensiones de falta de la red de secuencia inversa

```



```
U_A2f=-Zbarra(1,5)*If2;
U_B2f=-Zbarra(2,5)*If2;
U_C2f=-Zbarra(3,5)*If2;
U_T2f=-Zbarra(4,5)*If2;
U_P2f=-Zbarra(5,5)*If2;
```

#### %6.4. Cálculo de las corrientes de falta de la red de secuencia inversa

```
I_A2f=(U_A2f-U_T2f)/Z11AT;
I_B2f=(U_B2f-U_P2f)/(d*Z11BT);
I_C2f=(U_C2f-U_T2f)/Z11CT;
```

#### %6.5. Cálculo de las tensiones de falta de la red de secuencia homopolar

```
U_A0f=-Zbarra_hom(1,5)*If0;
U_B0f=-Zbarra_hom(2,5)*If0;
U_C0f=-Zbarra_hom(3,5)*If0;
U_T0f=-Zbarra_hom(4,5)*If0;
U_P0f=-Zbarra_hom(5,5)*If0;
```

#### %6.6. Cálculo de las corrientes de falta de la red de secuencia homopolar

```
I_A0f=(U_A0f-U_T0f)/Z01AT;
I_B0f=(U_B0f-U_P0f)/(d*Z01BT);
I_C0f=(U_C0f-U_T0f)/Z01CT;
```

#### %7. Cálculo de componentes de fase de tensiones e intensidades de falta a

%partir de componentes simétricas previamente calculadas

```
A=[1 1 1;
1 (cos(-120*pi/180)+i*sin(-120*pi/180))
(cos(120*pi/180)+i*sin(120*pi/180));
1 (cos(120*pi/180)+i*sin(120*pi/180)) (cos(-120*pi/180)+i*sin(-
120*pi/180))];
```

#### %7.1. Componentes de fase de tensiones e intensidades de falta

```
V_A=A*[U_A0f;U_A1f;U_A2f];
U_Pf=A*[U_P0f;U_P1f;U_P2f];
I_A=A*[I_A0f;I_A1f;I_A2f];
I_B=A*[I_B0f;I_B1f;I_B2f];
I_C=A*[I_C0f;I_C1f;I_C2f];
I_Pf=A*[If0;If1;If2];
```